

SÉRIE A 1.178

N° D'ORDRE :

2.043

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. R. DUCHÊNE

1^{re} THÈSE

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES DÉFLAGRATIONS DANS LES MÉLANGES CARBURÉS GAZEUX

2^e THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le 3 décembre 1928, devant la Commission d'Examen

Jury. . . . { MM. COTTON *Président*
 MAILHE *Examineurs*
 VILLEY

SÉRIE A 1.178
N° D'ORDRE :
2.043

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. R. DUCHÊNE

1^{re} THÈSE

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES DÉFLAGRATIONS DANS LES MÉLANGES CARBURÉS GAZEUX

2^e THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le 13 décembre 1928, devant la Commission d'Examen

Jury. . . . { MM. COTTON } *Président*
 { MAILHE } *Examineurs*
 { VILLEY }

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen..... C. MAURAIN *Professeur*... Physique du globe.

Doyens honoraires P. APPELL, M. MOLLIARD.

Professeurs honoraires ..

- V. BOUSSINESQ.
- A. JOANNIS.
- H. LE CHATELIER.
- H. LEBESGUE.
- A. FERNBACH.
- A. LEDUC.
- R. DONGIER.
- E. HÉROUARD.

Professeurs.....

- ÉMILE PICARD Analyse supérieure et algèbre supérieure.
- G. KÖNIGS..... Mécanique physique et expérimentale.
- E. GOURSAT..... Calcul différentiel et calcul intégral.
- P. JANET..... Électrotechnique générale.
- F. WALLERANT..... Minéralogie.
- H. ANDOYER..... Astronomie.
- P. PAINLEVÉ..... Mécanique analytique et mécanique céleste.
- Gabriel BERTRAND..... Chimie biologique.
- M^{me} P. CURIE..... Physique générale et radioactivité.
- M. CAULLERY..... Zoologie (Évolution des êtres organisés).
- G. URBAIN..... Chimie minérale.
- Émile BOREL..... Calcul des probabilités et Physique mathém.
- L. MARCHIS..... Aviation.
- Jean PERRIN..... Chimie physique.
- Rémy PERRIER..... Zoologie (Enseignement P. C. N.).
- H. ABRAHAM..... Physique.
- M. MOLLIARD..... Physiologie végétale.
- E. CARTAN..... Géométrie supérieure.
- L. LAPICQUE..... Physiologie générale.
- E. VESSIOT..... Théorie des fonctions et théorie des transformations
- A. COTTON..... Physique générale.
- J. DRACH..... Application de l'analyse à la géométrie.
- Charles FABRY..... Physique.
- Charles PÉREZ..... Zoologie.
- Léon BERTRAND..... Géologie structurale et géologie appliquée.
- R. LESPIEAU..... Théories chimiques.
- E. RABAUD..... Biologie expérimentale.
- P. PORTIER..... Physiologie comparée.
- E. BLAISE..... Chimie organique.
- P.-A. DANGEARD..... Botanique.
- Paul MONTEL..... Mécanique rationnelle.
- P. WINTREBERT..... Anatomie et histologie comparées.
- O. DUBOSCQ..... Biologie maritime
- G. JULIA..... Mathématiques générales.
- A. MAILHE..... Étude des combustibles.
- L. LUTAUD..... Géographie physique et géologie dynamique.
- Eugène BLOCH..... Physique théorique et physique céleste.
- H. VILLAT..... Mécanique des fluides et applications.
- Ch. JACOB..... Géologie.
- P. PASCAL..... Chimie appliquée.
- N..... Chimie générale.



E. PÉCHARD.....	Chimie (Enseignement P. C. N.).	G. BRUHAT.....	Physique.
V. AUGER.....	Chimie analytique.	H. MOUTON.....	Chimie physique.
M. GUICHARD.....	Chimie minérale.	L. JOLEAUD.....	Paléontologie.
A. GUILLET.....	Physique.	M. JAVILLIER.....	Chimie biologique.
G. MAUGUIN.....	Minéralogie.	A. DUFOUR.....	Physique (P. C. N.).
L. BLARINGHEM.....	Botanique.	F. PICARD.....	Zoologie (Évolution des êtres organisés).
A. MICHEL-LÉVY.....	Pétrographie.	ROBERT-LÉVY.....	Zoologie.
A. DEREIMS.....	Géologie.	L. DUNOYER.....	Optique appliquée.
A. DENJOY.....	Calcul différentiel et intégral.	A. GUILLIERMOND.....	Botanique (P. C. N.).
H. BÉNARD.....	Physique (P. C. N.).	A. DEBIERNE.....	Radioactivité.
E. DARMOIS.....	Physique.		

Secrétaire Daniel TOMBECK.

A

M. COTTON, *Membre de l'Institut*
Directeur du Laboratoire des recherches physiques

Hommage reconnaissant

A

MM. JEAN VILLEY et M. AUBERT

Témoignage d'affectueuse reconnaissance

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE
DES DÉFLAGRATIONS
DANS LES MÉLANGES CARBURÉS GAZEUX



Table des Matières

Paragr.		Pages
CHAPITRE I. — HISTORIQUE		
1)	Les déflagrations en général	5
2)	Historique	5
3)	Détonations	9
4)	Déflagrations	9
CHAPITRE II. — OBJET de l'ÉTUDE et APPAREIL		
5)	Objet de l'étude	11
7)	Cylindre de compression et chambre d'explosion	11
8)	Carburateur	13
9)	Compression	14
10)	Allumage	15
11)	Appareil photographique	15
CHAPITRE III. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX		
12)	Allure générale de la courbe	16
13)	Mesure de la vitesse sur la courbe	16
14)	Influence de l'étincelle d'allumage	17
15)	Influence de la concentration du mélange carburé	18
16)	— — — — Benzène	18
17-18)	— — — — Cyclohexane	19
19-20)	— — — — Cyclohexène	20
21-22)	— — — — Hexane	22
24)	— de la température initiale du mélange	24
25)	— du taux de compression	26
26)	— du plomb tétréthyle	27
27)	— de la longueur du tube	27
28)	Remarque sur l'influence d'une série d'étincelles	29
CHAPITRE IV. — DISCUSSION des PRÉCÉDENTS RÉSULTATS		
29)	Aspect des courbes	30
30)	La réaction se produirait par phases successives	32
31)	Limites d'inflammabilité	32
32)	Déflagration et détonation	33
33)	Rôle des anti-détonants	34
34)	Chasse préalable	34
CHAPITRE V. — ESSAI d'ANALYSE du PHÉNOMÈNE		
35)	Hypothèses	35
36)	Relations entre chaleurs spécifiques	35
37)	Relations entre la fraction brûlée du mélange et la pression	36
38)	Calcul de K	38
39)	Calcul de H , γ' , γ''	39
40)	Valeurs numériques	40
41)	Note	41

CHAPITRE I

HISTORIQUE

1) Les déflagrations.

L'étude de la propagation d'une combustion vive dans un mélange explosif a fait l'objet de nombreuses recherches et le désir de perfectionner sans cesse la technique des moteurs à explosion en suscite chaque jour de nouvelles.

Si on enflamme un mélange de gaz combustible et d'air, contenu dans un long tube de verre, on voit initialement la flamme se propager lentement et de façon régulière. A partir d'une certaine distance cependant cette régularité cesse généralement et les accélérations observées sont quelquefois considérables.

Si, au lieu d'opérer sur un gaz immobile contenu dans un tube, on fait écouler le mélange combustible dans celui-ci et si on l'enflamme à la sortie, on constate que la flamme se déplace, en remontant le courant, plus lentement que dans le cas précédent. Pour une certaine vitesse du courant gazeux, la flamme restera stationnaire. La vitesse de propagation de la flamme est alors égale et de signe contraire à la vitesse du courant gazeux.

Il est convenu de désigner ces combustions à propagation lente sous le nom de *déflagrations* ; nous en donnerons d'ailleurs plus loin des caractéristiques plus précises.

2) Historique.

Davy ⁽¹⁾, en 1816, remarque que dans le mélange le plus combustible de grisou et d'air, la flamme met moins de une seconde à traverser un tube de un pied de longueur. S'apercevant que cette combustion cesse lorsque le tube est d'un diamètre assez petit, il a l'idée de la construction des lampes antigrisouteuses où les mailles très petites d'une toile métallique agissent comme des tubes très petits.

Bunsen ⁽²⁾, en 1866, mesure la vitesse propagation de la flamme dans un mélange d'hydrogène et d'oxygène, il trouve 30 mètres par seconde. Pour cette détermination, il fait écouler le mélange gazeux par un orifice à minces parois et équilibre la vitesse de propagation par la vitesse du courant gazeux.

Schœsing et Mondésir placent des repères sur un tube de verre contenant un mélange d'air et d'oxyde de carbone. La propagation est assez lente pour permettre des observations directes. Ces chercheurs signalent l'importance de l'agitation du mélange au moment de la propagation.

Mallard ⁽³⁾ reprend la méthode de Bunsen. A un volume d'air, il ajoute des quantités croissantes de gaz combustible et il constate que la vitesse de propagation croît, puis décroît, en passant par un maximum. Les vitesses varient linéairement avec les quantités de gaz combustible. La vitesse maxima n'est pas obtenue avec le « mélange chimique » qui renferme 9,4 % de formène, mais avec celui qui renferme 12 % de ce gaz.

(1) Soc. Roy. de Londres, 9 novembre 1815; *Ann. de Ch. et de Ph.*, 1816, t. I, p. 136, 1817.

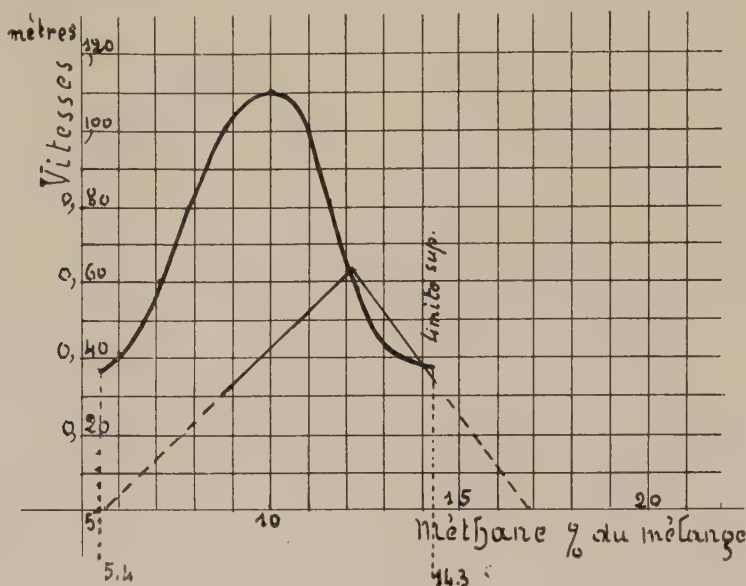
(2) *Pogg, Ann.*, 1866, t. 131, p. 161.

(3) *Ann. des Mines*, 7^e série, t. VII, p. 135.

En prolongeant les deux droites du diagramme jusqu'à leur rencontre avec l'axe de vitesse nulle, cet auteur avait pensé déterminer la composition des mélanges limites à vitesse nulle, autrement dit, obtenir les limites d'inflammabilité inférieure et supérieure du mélange considéré. M. Le Chatelier ⁽¹⁾ a reconnu que cette conception n'était pas tout à fait exacte.

Plus récemment, Richard Wheeler ⁽²⁾ a d'ailleurs montré que le diagramme ne se composait pas de deux droites concourantes, mais d'une courbe dont les parties voisines des limites d'inflammabilité s'infléchissent parallèlement à l'axe des % (fig. 1).

Fonseca Bonevides ⁽³⁾ en utilisant la méthode de Bunsen donne des chiffres pour les vitesses de flamme dans différents mélanges.



(Fig. 1)

Mallard et Le Chatelier ⁽⁴⁾ perfectionnent considérablement la technique opératoire pour ce genre de recherches. Ils utilisent pour signaler le passage de la flamme en un point du tube des procédés soit électrique, pneumatique ou photographique. Ce dernier semble avoir donné la meilleure moisson de résultats, il est d'ailleurs employé couramment dans les travaux récents.

Principe du procédé photographique. — La propagation se faisant dans un tube de verre disposé horizontalement, la lumière émise par la flamme impressionne un papier sensible ou une plaque se déplaçant à une vitesse connue dans un plan vertical parallèle au tube. Le front de propagation s'inscrit ainsi suivant une courbe des espaces parcourus en fonction du temps.

MM. Mallard et Le Chatelier enregistraient les impressions lumineuses soit sur une plaque tombant verticalement entre deux glissières, soit sur du papier sensible enroulé sur un tambour tournant.

Dans le premier cas, la vitesse était calculée d'après la hauteur de chute et dans le second un diapason battant le 1/100 de seconde provoquait des éclipses sur un rayon lumineux émané d'un fil de magnésium qui brûlait.

Les expériences de ces auteurs portèrent sur des mélanges à flamme très actinique, tels que $\text{CS}_2 + \text{O}_2$ et $\text{CS}_2 + \text{NO}_2$, dans un long tube ouvert.

Les résultats obtenus étant fondamentaux, nous allons les résumer brièvement.

La courbe enregistrée présente trois parties distinctes :

1° Une propagation à vitesse constante à partir de l'étincelle (région OA de la figure 2).

(1) A. M., 8^e série, t. XIX, p. 388, 1891.

(2) Chem. Soc. Trans., 1914, t. 105, p. 2.606.

(3) Journal de Sciencias, matematicas, physicas et naturaes, t. XXII, 1880, Lisbonne.

(4) Ann. des Mines, 2^e série, t. IV, p. 296.

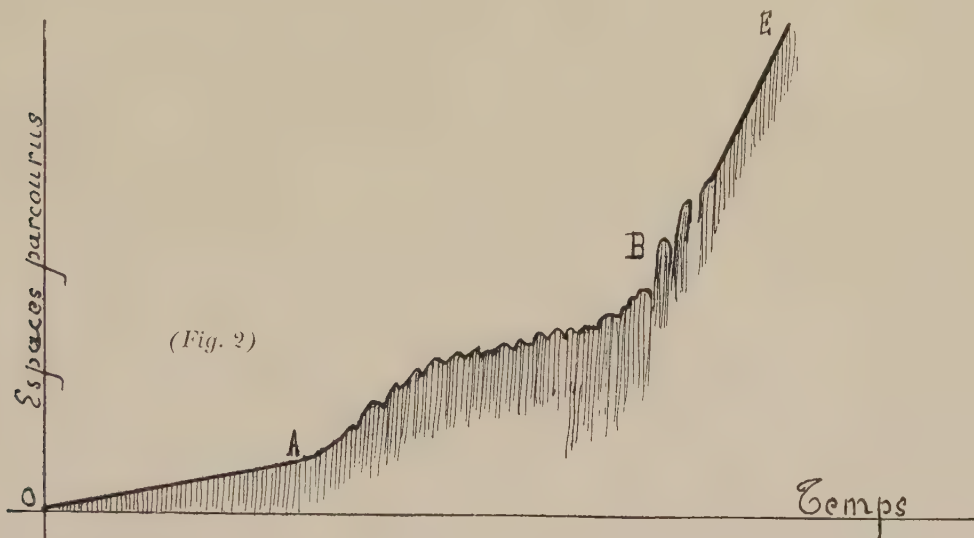
2° Une propagation à vitesse très variable correspondant à un état vibratoire du mélange (région AB).

3° Quelquefois une propagation très rapide à vitesse constante (région BE).

Ce dernier mode de propagation a reçu le nom de « régime détonant »; il s'y propage « l'onde explosive », découverte simultanément et par des procédés différents par MM. Le Chatelier et Vieille.

La vitesse de l'onde explosive s'est révélée être une grandeur physique caractéristique d'un mélange combustible donné.

La forme du récipient contenant ce mélange, sa constitution, la nature de ses parois, etc.



semblent sans influence sur cette grandeur. La pression et la température ont des actions faibles sur elle.

La vitesse de l'onde explosive est considérable; elle est de l'ordre de plusieurs milliers de mètres par seconde.

Les propagations autres que l'onde explosive sont appelées « déflagrations ». En général, si la flamme prend naissance loin d'un obstacle, dans un tube ouvert aux deux bouts, par exemple, elle se propage tout d'abord d'un mouvement uniforme, mais les mouvements divers qui s'établissent en avant de la flamme (mouvement d'ensemble des gaz ou état vibratoire) font ensuite prendre à celle-ci des vitesses variées. Cette vitesse initiale constante dépend elle-même de divers facteurs autres que la composition du mélange, la pression et la température, comme on peut le voir dans le tableau suivant, tiré des essais de MM. Mallard et Chatelier ⁽¹⁾.

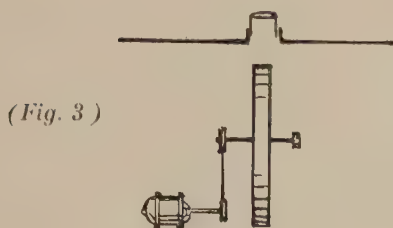
MÉLANGES GAZEUX	DIMENSIONS DU TUBE		CHEMIN PARCOURU à vitesse uniforme m.	VITESSE m.
	LONGUEUR	DIAMÈTRE		
	m.	mm.		
CS ² + 3NO ²	3	30	1	1,25
	2	20		1,34
	1	20		1,30
		30	0,80	
		20		
		10		
		4	0,50	0,00
		10		0,75
		20		1,28
		30		1,35

(1) Ann. des Mines, t. IV, p. 296.

La position de la mise de feu dans le tube a une importance considérable sur la courbe du front de flamme en fonction du temps. Alors que l'allumage à l'extrémité ouverte d'un tube donne une courbe du genre de celle de la *figure 2*, avec une droite au début, la mise de feu à l'extrémité fermée détermine une propagation d'allure parabolique dès l'origine. Cette modification d'allure de la courbe s'explique par le fait que, à la vitesse de propagation de la flamme, s'ajoute la vitesse de déplacement des gaz vers l'orifice. Les gaz brûlés chauds poussent les gaz vierges et, par suite, la flamme se déplace suivant un mouvement résultant.

Dixon ⁽¹⁾ a continué ces études par la méthode photographique en utilisant un film enroulé sur une roue de un mètre de circonférence et pouvant tourner à raison de 30 à 100 tours par seconde.

Cet auteur a particulièrement étudié la propagation de la flamme dans un mélange enflammé par compression adiabatique. Le mélange est emprisonné dans un tube de verre entre son extrémité fermée et un piston qui glisse dans ce tube (*fig. 3*).



Ce dispositif est placé horizontalement devant la roue portant le film qui tourne dans un plan vertical. Le piston est enfoncé brusquement dans le tube au moyen d'un mouton tombant sur l'extrémité de sa tige.

L'échauffement dû à la compression adiabatique provoque l'auto-inflammation du mélange dont l'image est projetée sur le film au moyen d'un objectif photographique.

Dixon obtient ainsi des renseignements intéressants sur : la naissance de la flamme, le taux de compression volumétrique nécessaire pour obtenir l'inflammation, la vitesse de propagation de la flamme et la naissance de l'onde explosive.

Dans une inflammation par compression adiabatique, on pourrait penser qu'un grand nombre de points du mélange se trouvent portés simultanément à la même température et que, par suite, il devrait se produire une inflammation de l'ensemble de la masse; en fait, on observe la naissance d'une flamme en un point, au hasard des petites hétérogénéités locales. Sur certaines photos apparaît nettement la propagation rectiligne, et presque perpendiculaire aux bords du film, de l'onde explosive.

Les essais de Dixon ont porté sur de nombreux mélanges gazeux et même sur des mélanges de vapeurs combustibles et d'air maintenus à des températures entre 50° et 100°. Cet auteur a également utilisé l'allumage par étincelle électrique en fin de compression.

Dixon conclut que la forme et la dimension du cylindre d'explosion, la position de l'étincelle ont une grande influence sur l'allure de la courbe de propagation.

Récemment, M. Laffitte ⁽²⁾, au cours d'une nouvelle étude de l'onde explosive, a obtenu de très belles photographies de propagations dans des mélanges gazeux. Le tube d'expérience était fermé aux deux bouts. On voit très nettement s'établir le régime détonant après une propagation déflagrante à vitesses variées. On ne relève pas de période oscillatoire comme dans les expériences de M. Le Chatelier en tube ouvert.

La théorie mathématique de la propagation des explosions a été faite par MM. Chapman, Jouguet et Crussard ⁽³⁾.

Nous pensons qu'il n'est pas inutile de rappeler ici les principaux résultats auxquels ont mené ces études théoriques.

Dans un gaz inerte, on conçoit la propagation d'un choc initial par compression adiabatique des tranches successives à la manière dont se propage un coup de tampon reçu

(1) *Journal Chemical Soc.* t. XCVII, part. I, 1910, p. 661 et t. CXXIII, 1923, p. 1.025.

(2) *Ann. de Physique*, X^e série, t. IV, novembre-décembre 1925.

(3) CHAPMAN, *Phil. Mag.*, 1899; JOUGUET, *Méc. des explosifs*, (Doin); CRUSSARD, *Bull. Soc. Ind. M^{le}*, n° 5, t. VI, 1907.

en queue d'une rame de wagons. Chaque tranche gazeuse, comprimée par l'expansion de la tranche précédente, voit sa température s'élever, puis se détend brusquement. C'est le mécanisme de l'onde de choc étudié par Riemann ⁽¹⁾ et Hugoniot ⁽²⁾.

3) Détonations.

Si, au lieu de se faire dans un gaz inerte, cette propagation a lieu dans un mélange explosif, on conçoit que l'élévation de température d'une tranche, due à la compression, pourra atteindre le point d'inflammation. Cette tranche va brûler et l'énergie, libérée de ce fait provoquera une détente de cette tranche susceptible de porter la tranche suivante de gaz vierges à la température d'inflammation.

On admet que dans le régime détonant où on observe l'onde explosive, il y a synchronisme entre l'onde de choc et la propagation de la réaction chimique. Les gaz vierges en avant de cette « onde de choc et combustion » ⁽³⁾ ne sont atteints par aucune perturbation préalable qui modifierait leur état et c'est dans ce fait qu'il faut chercher l'explication de la constance de la vitesse de l'onde explosive.

Cette hypothèse a été vérifiée, *a posteriori*, par une concordance remarquable entre les chiffres calculés d'après les formules que l'on a pu établir (Jouguet) et les chiffres trouvés expérimentalement.

4) Déflagrations.

Si la transmission de compression d'une tranche par la précédente est insuffisante pour l'enflammer, la propagation de la réaction exige une transmission de chaleur par conductibilité d'une tranche à l'autre et le phénomène sera entièrement différent.

L'onde de choc se propagera dans le mélange sans déterminer de réaction chimique et celle-ci se propagera, avec une vitesse moindre, par le jeu de la conductibilité.

La flamme parcourra des gaz vierges qui auront déjà été traversés par une onde mécanique. On conçoit que l'importance de celle-ci soit de nature à modifier la vitesse de propagation de la flamme. Les variations observées dans la vitesse des propagations déflagrantes doivent provenir de cet état de choses, ainsi que du fait que, les réactions se faisant bien plus lentement que dans le cas susvisé, la déperdition de chaleur par les parois doit dépendre de la nature de celles-ci et de la forme des récipients.

Il résulte de ces considérations que l'étude des déflagrations est beaucoup plus complexe que celle des régimes détonants. Dans un espace clos, où les ondes de chocs se réfléchissent sur les fonds, le problème est encore plus délicat.

Pour ces raisons, la théorie n'a pu être à peu près faite que dans le cas d'une propagation dans un tube indéfini. M. Jouguet a établi la formule suivante pour la célérité des déflagrations :

$$u_0 = \frac{T_0}{\sqrt{p_0}} \sqrt{\frac{n R k A}{C}} \sqrt{\frac{\theta - \tau}{\tau - T_0}}$$

où :

T_0 = température initiale du mélange.

p_0 = pression initiale.

R = constante universelle des gaz donnée par $p \sigma = n R T$.

k = coefficient de conductibilité.

A = coefficient de vitesse de réaction.

C = ch. sp. à pr. constante.

θ = température de combustion.

τ = température d'inflammation.

(1) Traduction française des œuvres de RIEMANN.

(2) Propagation du mouvement dans un fluide indéfini; *J. de math. pures et appl.*, 4^e sér., t. III, p. 477, 1887.

(3) Dénomination due à M. Jouguet.

Cette formule n'est, en fait, qu'une indication destinée surtout à montrer les grandeurs dont dépend u_0 .

Son application est impossible du fait que l'on ne connaît pas la façon dont varie A (coefficient de vitesse de réaction). Elle explique, entre autres, le fait que la vitesse maxima d'un mélange d'hydrogène et d'oxygène est obtenue par une proportion d'hydrogène bien plus grande que celle correspondant au mélange chimique (40 % au lieu de 29 %). On sait, en effet, que la conductibilité calorifique de l'hydrogène est six fois celle de l'air, donc il est possible qu'avec des mélanges contenant plus de 1/3 de leur volume d'hydrogène, le gain en conductibilité ait un effet qui surpasse celui de la diminution de température de combustion.

Pour le méthane et l'air, le phénomène doit être bien moins marqué, car :

$$k \text{ (méthane)} = 6,47 \times 10^{-5}$$

alors que :

$$k \text{ (air)} = 5,22 \times 10^{-5}$$

Nous avons vu, en effet, que la vitesse maxima est obtenue pour le mélange à 12 %, alors que le mélange chimique correspond à 9,4 %.

CHAPITRE II

OBJET de l'ÉTUDE et DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

5) Objet.

Dans la présente étude, on s'est proposé de mettre au point un appareil permettant d'étudier la propagation déflagrante dans des mélanges d'air et de carbures renfermés dans un espace clos, la mise de feu se faisant par étincelle électrique en fin de compression adiabatique du mélange. Ces conditions expérimentales tendent à se rapprocher de celles dans lesquelles se produisent les phénomènes dans les cylindres de moteurs.

Avec cet appareil, on a cherché à déterminer :

1° L'influence de la richesse du mélange sur la vitesse de propagation, les carbures employés étant le benzène C^6H^6 , le cyclohexane C^6H^{12} , le cyclohexène C^6H^{10} et l'hexane C^6H^{14} .

2° L'influence du taux de compression volumétrique sur l'un de ces carbures (le cyclohexane).

3° L'influence de la variation de la température initiale du mélange avant compression.

4° L'effet du plomb-tétréthyle sur la propagation, et notamment sur la naissance du régime détonant.

6) Appareil.

L'appareil employé est inspiré de celui de Dixon; il comprend (*fig. 4*) :

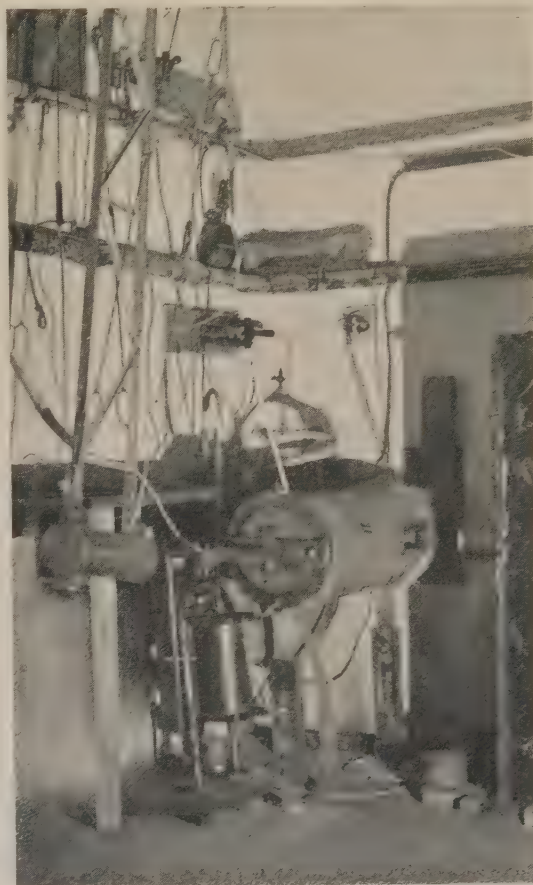
1° Le cylindre de compression et la chambre d'explosion qui peuvent être maintenus à une température déterminée.

2° Le carburateur.

3° Le dispositif de compression brusque.

4° Le système d'allumage.

5° L'appareil photographique.

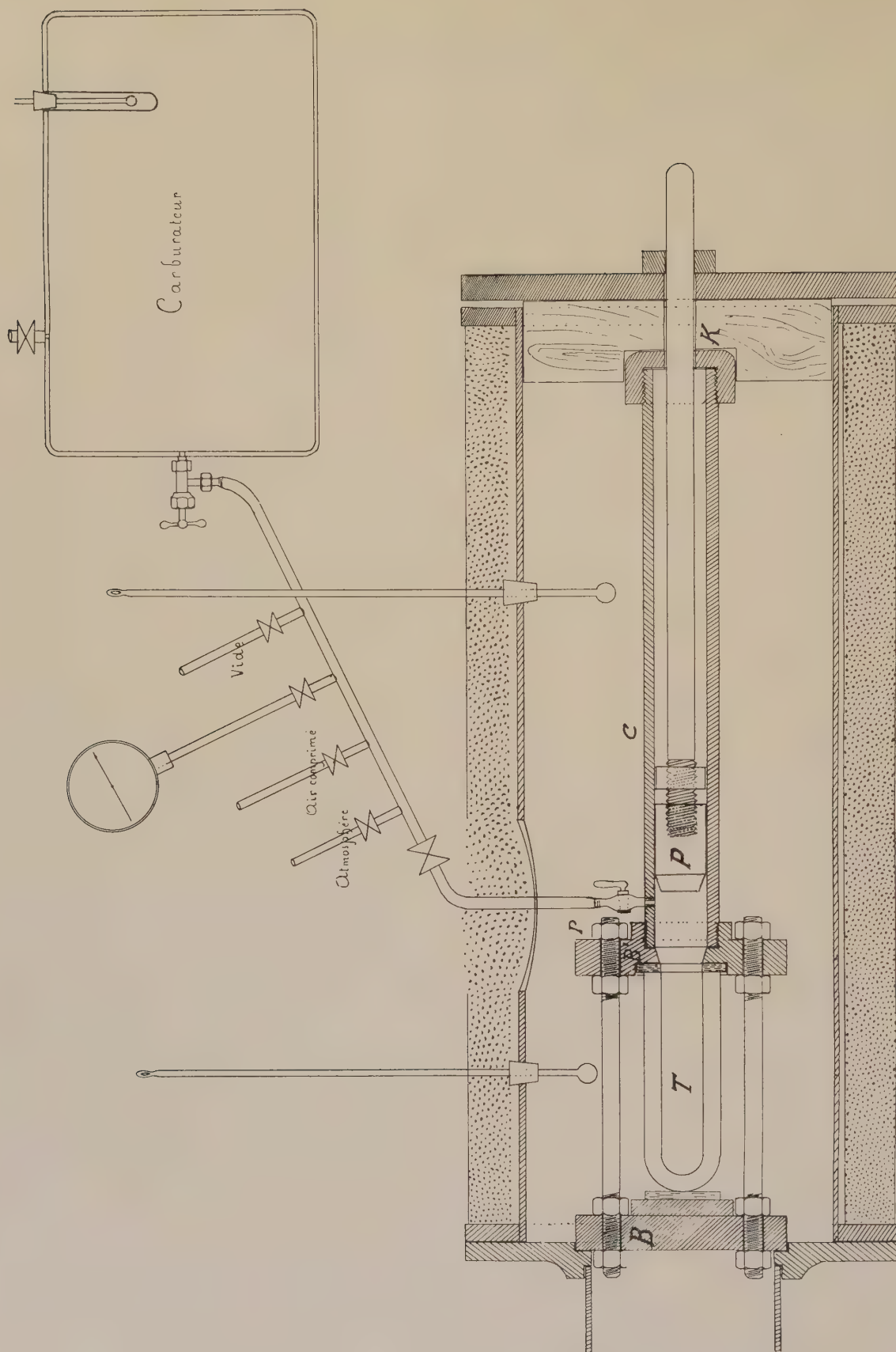


(Fig. 4)

7) Cylindre de compression et chambre d'explosion.

Nous avons cherché à diminuer la fragilité de l'appareil de Dixon en effectuant la compression dans un cylindre d'acier de 30 mm. d'alésage; la chambre d'explosion seule étant en verre (*fig. 5 et 6*).

Ce dispositif permet d'employer un piston en acier muni de segments en fonte et l'étanchéité obtenue est très satisfaisante. Un cuir, placé derrière les segments et que l'on graisse très légèrement de temps en temps, assure un glissement facile.



(Fig. 6) APPAREIL DE COMPRESSION

La course est de 262 mm.; la tige du piston est guidée par une bague K vissée à l'extrémité du cylindre opposée au tube de verre. L'autre extrémité porte une bride B'



(Fig. 5)

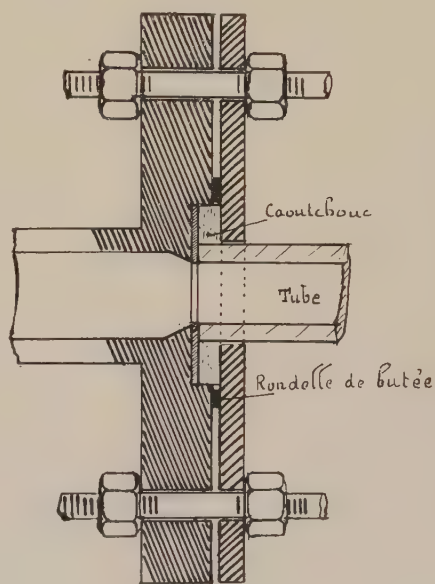
contre laquelle vient s'appliquer l'extrémité ouverte du tube. Celui-ci est en Pyrex de 3 mm. d'épaisseur. Les deux modèles employés au cours des essais ont été représentés (fig. 9). Le tube est serré par des tirants entre le cylindre en acier, auquel il présente son extrémité ouverte, et une seconde bride de butée B.

Comme le serrage doit être très léger, sous peine d'écraser le tube, on a disposé un presse-étoupe pour assurer l'étanchéité entre le tube de verre et le cylindre d'acier (fig. 7).

L'extrémité fermée du tube porte deux électrodes en tungstène; elle bute sur la bride B par l'intermédiaire d'un cuir épais.

La bride B' porte un robinet pointeau *r* qui communique avec la chambre d'explosion par un canal foré dans la bride (1). C'est par cette voie que les gaz sont introduits dans le cylindre ou en sont extraits.

Le cylindre est placé et calé dans une étuve en tôle calorifugée. Un chauffage électrique permet d'amener sa température à 80° en 50 minutes. La température est contrôlée par deux thermomètres placés à chacune des extrémités de l'étuve. Celle-ci ne présente que deux ouvertures, l'une en face du tube de verre pour permettre la photographie, l'autre à la partie supérieure, seulement découverte pour manœuvrer le robinet *r*.



(Fig. 7) JOINT ENTRE TUBE ET CYLINDRE

8) Le carburateur.

Le mélange gazeux est préparé dans un récipient en fer de 2 litres de capacité (fig. 8). Deux offices permettent, l'un M, d'introduire le liquide à étudier; l'autre R, de faire le vide, d'introduire de l'air comprimé, d'établir la communication avec le cylindre, d'expulser le mélange gazeux à l'extérieur après l'essai.

Le carburateur peut être chauffé électriquement, ainsi que les tuyauteries le reliant au cylindre. Un thermomètre, placé dans une gaine, donne la température du mélange.

Un indicateur de vide et un manomètre sont branchés sur l'ensemble. Ces appareils permettent de s'assurer avant chaque essai de l'étanchéité.

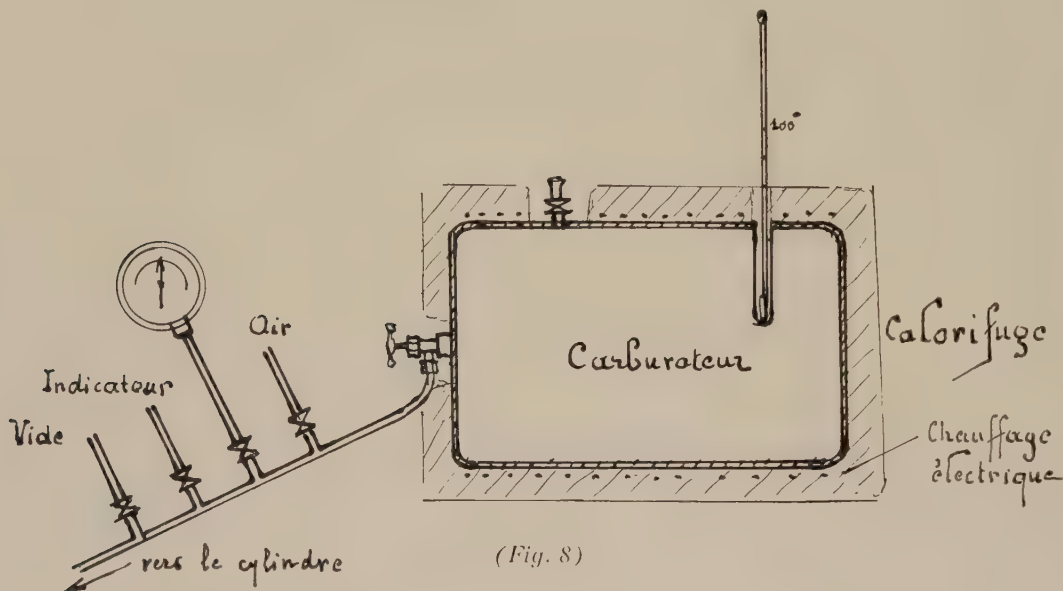
Au moyen d'une pipette graduée au 1/100 de cm³, on introduit par le robinet M la quantité voulue de carbure. On remplit aussitôt d'air à une pression donnée (1 kg. 500 par exemple); cette opération se faisant très rapidement, on peut négliger l'influence de la tension

(1) Le dessin (fig. 6) n'est pas conforme sur ce point.

de vapeur de l'hydrocarbure au cours de l'établissement de la pression finale. On connaît donc ainsi le rapport $\frac{\text{carbure}}{\text{air}} = c$ donnant en poids la composition du mélange.

Ce remplissage effectué, on chauffe le mélange jusqu'à une température où le carbure est certainement vaporisé (110° pour les carbures en C⁶ étudiés).

En même temps, l'étuve contenant le cylindre est chauffée et quand la température fixée est atteinte (80°, par exemple), on procède au remplissage de celui-ci. Pour cela, on fait d'abord le vide dans le cylindre et dans toutes les tuyauteries, puis, par un simple jeu de robinets on introduit le mélange. On établit la communication avec l'extérieur pour laisser échapper l'excès de mélange. On ferme alors le pointeau R .



9) La compression.

Un mouton d'acier pesant environ 10 kg. est suspendu au plafond par un bras en treillis d'aluminium de 2 m. 50 de longueur (fig. 9 bis).

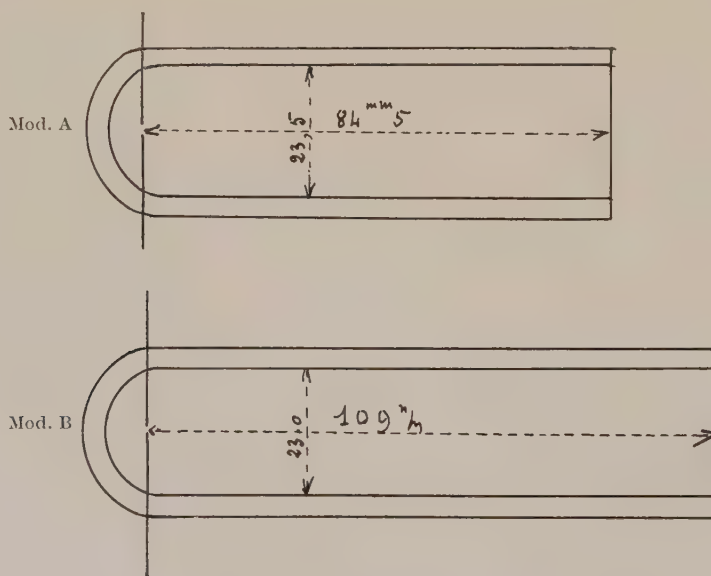


Fig. 9) TUBES UTILISÉS AU COURS DES ESSAIS

La rigidité du système dans le plan vertical du déplacement a été obtenue au moyen de haubans en acier qui relient en triangle la masse du mouton à l'axe de rotation.

Ce pendule, lâché lorsqu'il est écarté de sa position d'équilibre, vient s'abattre sur la tige du piston avec d'autant plus de vitesse qu'il est lâché de plus haut. La hauteur de chute est restée la même pour tous les essais.

Si on désigne par V le volume initial offert au mélange et par v le volume du tube de verre, le taux de compression sera : $r = \frac{V}{v}$.

10) L'allumage.

Un peu avant d'avoir poussé le piston à fond de course, le mouton déclenche un ressort qui ouvre brusquement le circuit primaire d'une bobine d'induction. Le secondaire fournit alors une étincelle entre les deux pointes de tungstène du tube.

Les caractéristiques de l'étincelle employée seront données avec les essais correspondants.

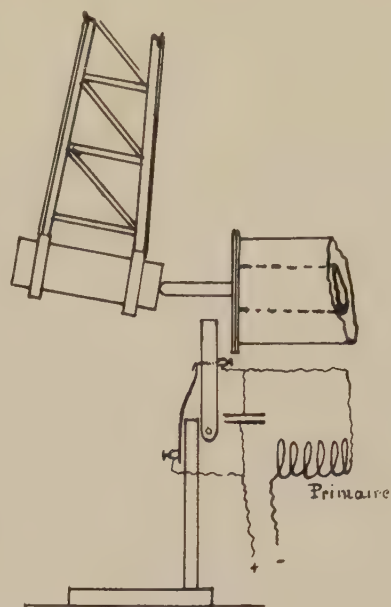
11) L'appareil photographique.

Cet appareil se compose d'un objectif à grande ouverture et à court foyer fixé sur une grande chambre noire montée sur roulettes et qui contient : une roue de 65 cm. de diamètre sur laquelle est enroulé un film de 2 mètres de longueur.

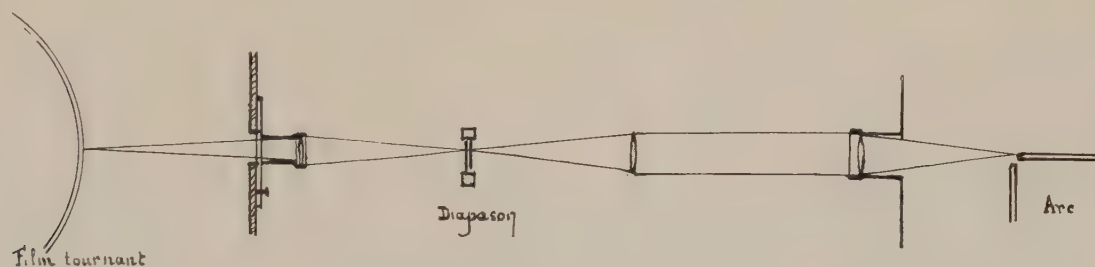
Cette roue qui peut tourner autour de son axe est mue par un petit moteur électrique. Sa vitesse peut varier de 4 à 10 tours par seconde.

Le film est fixé sur la périphérie au moyen de pointes reliant les deux extrémités et de petits crochets latéraux.

La chambre noire s'ouvre par la face portant l'objectif. Le contrôle de la mise au point se fait par une ouverture placée auprès de l'objectif.



(Fig. 9 bis) RUPTEUR



(Fig. 10) ENREGISTREMENT DES TEMPS

La vitesse de la roue est déterminée au moyen d'un contact qui, à chaque tour, ferme un circuit électrique actionnant un signal de Deprez. Ce signal inscrit les impulsions reçues sur un tambour tournant, alors qu'à côté de lui un autre signal semblable marque les périodes d'un diapason entretenu.

Au cours de nos essais, nous avons préféré inscrire les temps sur le film lui-même. A cet effet, un objectif à obturateur rapide a été placé sur la face de l'appareil photographique opposée à celle qui regarde le cylindre (fig. 10). Cet objectif donne sur le film l'image d'un point lumineux masqué périodiquement par les vibrations d'un diapason entretenu battant le 1/140 de seconde.

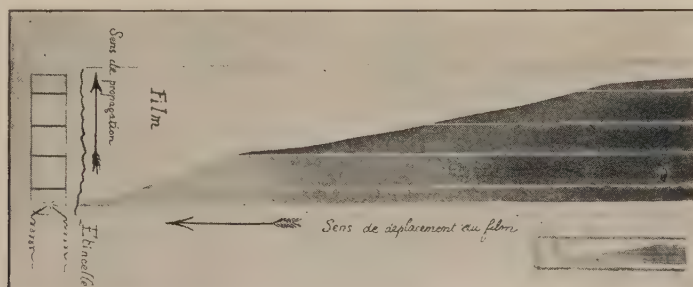
RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

12) Allure générale du phénomène.

Toutes les photos obtenues présentent l'aspect général donné par la *figure 11*.

On remarque que le front de la flamme se propage à une vitesse variable d'un bout du tube à l'autre.

A l'origine, cette vitesse n'est pas nulle, pendant quelques millièmes de seconde (4 ou 5 pour les carbures en C⁶), elle va en croissant. La courbe présentant un premier point d'inflexion la vitesse passe par un maximum.



(Fig. 11)

Cette vitesse décroît ensuite rapidement pour passer par un minimum, la courbe offrant un second point d'inflexion.

La vitesse croît légèrement ensuite jusqu'à ce que le front de la flamme ait atteint l'extrémité du tube.

La combustion n'est pas terminée à ce moment et les gaz continuent à brûler pendant un temps du même ordre de grandeur que celui qui a été nécessaire au front de flamme pour effectuer la traversée du tube. Si l'on pouvait rapprocher l'intensité lumineuse enregistrée sur le film de l'intensité de la réaction chimique, on serait porté à croire que cette combustion, qui fait suite à la première propagation du front de flamme dans le mélange, est plus importante que la première.

13) Mesure de la vitesse.

La vitesse de déplacement du film est très exactement connue (§ 11) et des repères placés tous les deux centimètres sur le tube de verre permettent d'évaluer les espaces parcourus par le front.

Pour augmenter la précision des mesures, nous avons fait au pantographe un agrandissement de chaque photo. Sur les courbes obtenues, nous avons mesuré les différences d'ordonnées Δe correspondant à des différences d'abscisses Δt et nous avons pris pour la vitesse au temps $t + \frac{\Delta t}{2}$ la valeur $\frac{\Delta e}{\Delta t}$. Δt était pris égal à 1/2.000 de seconde.

14) Influence de l'étincelle d'allumage.

L'énergie électrique qui passe dans l'étincelle influe sur la propagation.
Cette influence a été observée :

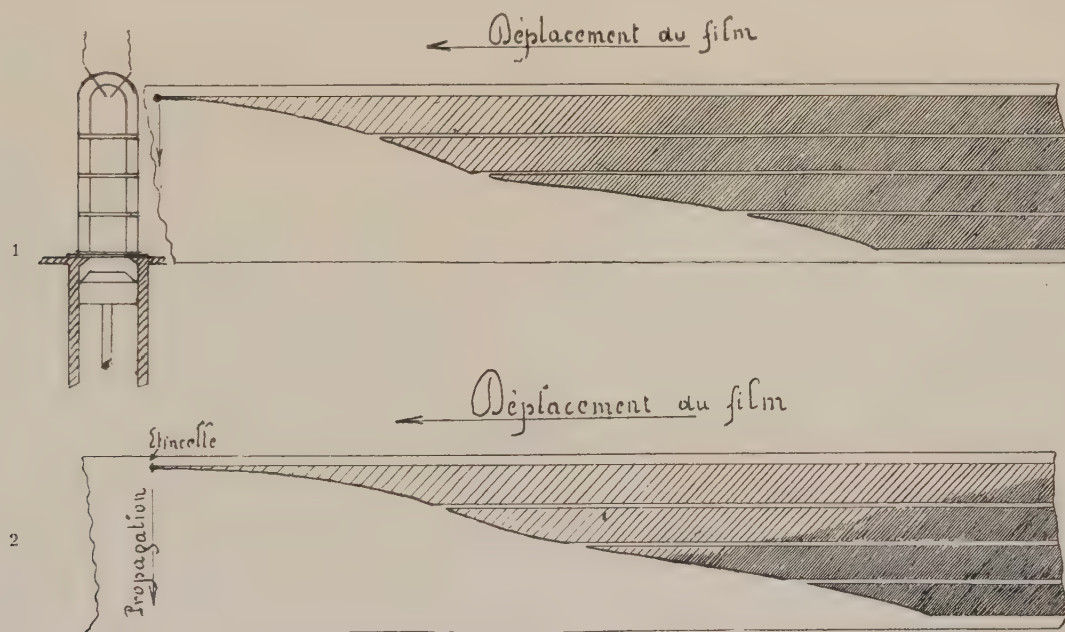
1^o Sur la limite inférieure d'inflammabilité comme le montre le tableau suivant :

CARBURES	DISTANCE EXPLOSIVE MAXIMA DANS L'AIR	
	15 mm.	6 mm.
	Une propagation s'établit pour la concentration minima :	La propagation ne s'établit pas encore pour $c =$
Cyclohexène	8,2	10,2
Hexane.....	6,4	8,5

L'étincelle a été caractérisée par sa distance explosive maxima, mais pour tous ces essais l'écartement des pointes est le même, soit 1 mm. environ.

La concentration indiquée est le rapport $100 \times \frac{\text{carbure}}{\text{air}}$, en poids.

2^o Sur le noircissement photographique qui est régulièrement progressif dans le premier cas (15 mm.) (*fig. 12₁*) et qui, dans le second, augmente de façon discontinue (*fig. 12₂*).



(Fig. 12)

Dans ce second cas (*fig. 12₂*), la propagation est extrêmement peu photogénique au début et, brusquement, vers le second point d'inflexion, il se fait une propagation très actinique, aussi bien dans les gaz vierges que dans ceux qui ont été traversés par le front de flamme. Il semble bien probable qu'à une première réaction en succède une seconde de nature différente à laquelle la première servirait d'amorce.

Dès que l'étincelle présente une distance explosive maxima supérieure à 10 mm., dans l'air à la pression atmosphérique, la propagation se développe toujours comme celle que donne l'étincelle de 15 mm. de distance explosive maxima, c'est-à-dire suivant le mode de la *figure 12₁*.

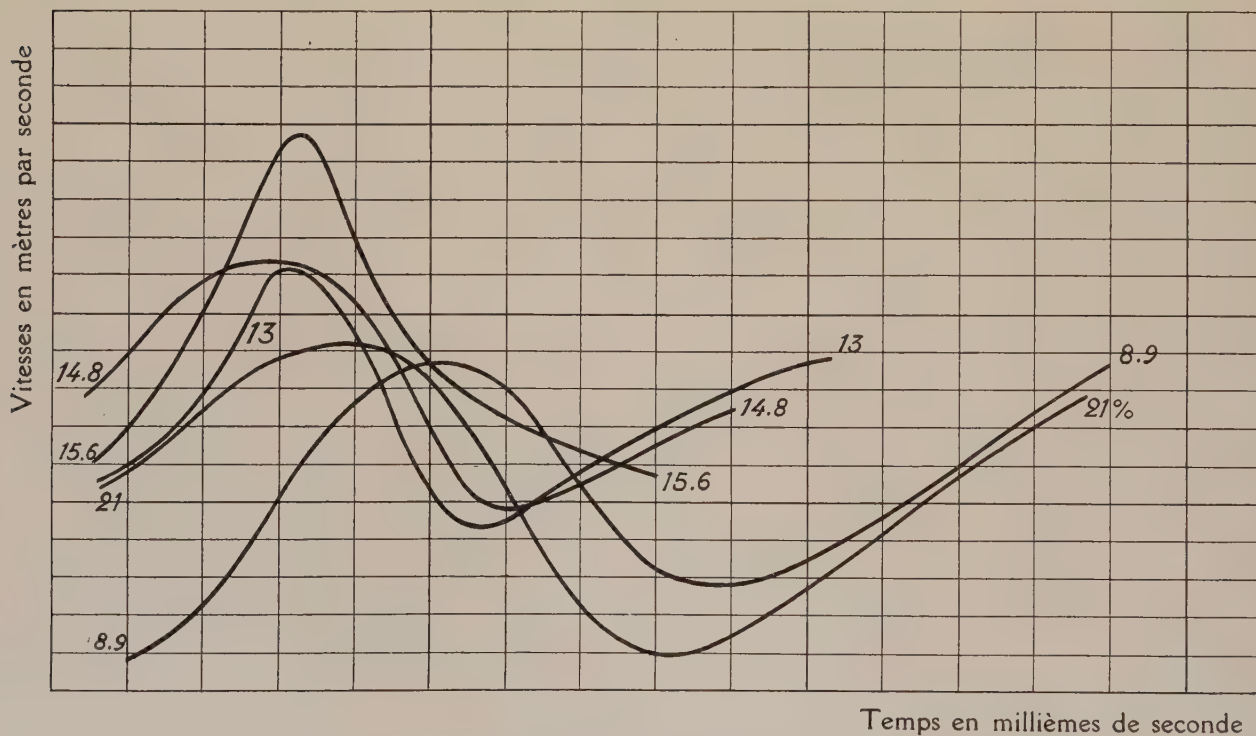
15) Influence de la concentration sur la vitesse du front de flamme.

Nous avons fait deux séries d'essais dans des conditions expérimentales A et B un peu différentes et nous donnons ci-après, par carbure, les courbes des vitesses du front de flamme en fonction du temps pour diverses richesses du mélange.

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

	A.	B
Dimensions du tube d'explosion (fig. 9).....	{ Long. 85 mm. 5 Diam. 23 mm. 5	{ Long. 109 mm. Diam. 23 mm.
Volume du tube d'explosion.....	37 cm ³	43 cm ³
Taux de compression r au moment de l'éclatement de l'étincelle	4,2	4,4
Température initiale du mélange (avant compression).	85°	85°
Caractéristique de l'étincelle (donné par la distance maxima d'éclatement).....	6 mm.	15 mm.

16) Benzène C^6H^6 $d_{18} = 0,880$ (fig. 13). — CONDITIONS EXPÉRIMENTALES : A



(Fig. 13) BENZÈNE

Courbes donnant pour diverses concentrations les vitesses du front de flamme en fonction du temps

Les chiffres portés sur les courbes indiquent la richesse du mélange $c = 100 \times \frac{\text{carbure}}{\text{air}}$, en poids.

Pour $c = 7,5$, l'enregistrement est très faible (non reporté sur le graphique) et se réduit à une frange donnant la propagation du front; les gaz ne présentent pas de luminosité actinique après le passage de la flamme.

Pour les concentrations, dont nous donnons les courbes de vitesses, le noircissement s'étend à tous les gaz brûlés en arrière du front; l'intensité lumineuse croît progressivement pour atteindre son maximum après que le front de flamme ait traversé le tube.

La durée nécessaire au front pour traverser le tube se lit sur le graphique, on voit que cette durée est maxima pour $c = 8,9$ et $c = 21$, c'est-à-dire pour les mélanges les plus riches ou les plus pauvres que nous ayons étudié. Pour $c = 15,6$, la vitesse atteinte est la plus grande et le temps nécessaire à la traversée du tube est minimum.

La durée totale de la luminosité varie de 26 à 29 millièmes de seconde.

17) Cyclohexane C_6H_{12} $d_0 = 0,809$ (fig. 14).

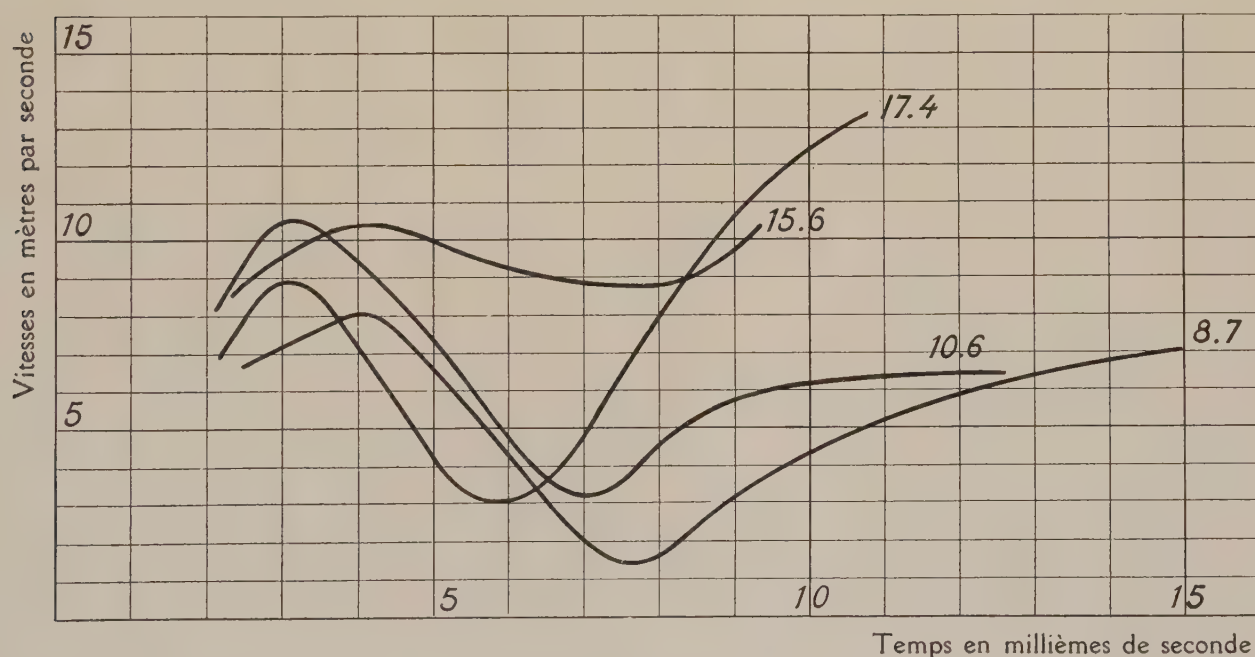
CONDITIONS EXPÉRIMENTALES : A

En général, la propagation est très peu actinique au début et devient brusquement très intense suivant le processus de la figure 12.

Il est à noter que la célérité maxima est obtenue pour $c = 15,6$, comme pour le benzène.

La célérité diminue pour les fortes comme pour les faibles concentrations.

La durée totale de la luminosité varie entre 22 et 30 millièmes de seconde, elle est donc de même ordre de grandeur que pour le benzène.



(Fig. 14) CYCLOHEXANE

Courbes donnant pour diverses concentrations les vitesses du front de flamme en fonction du temps

18) Cyclohexane (fig. 15).

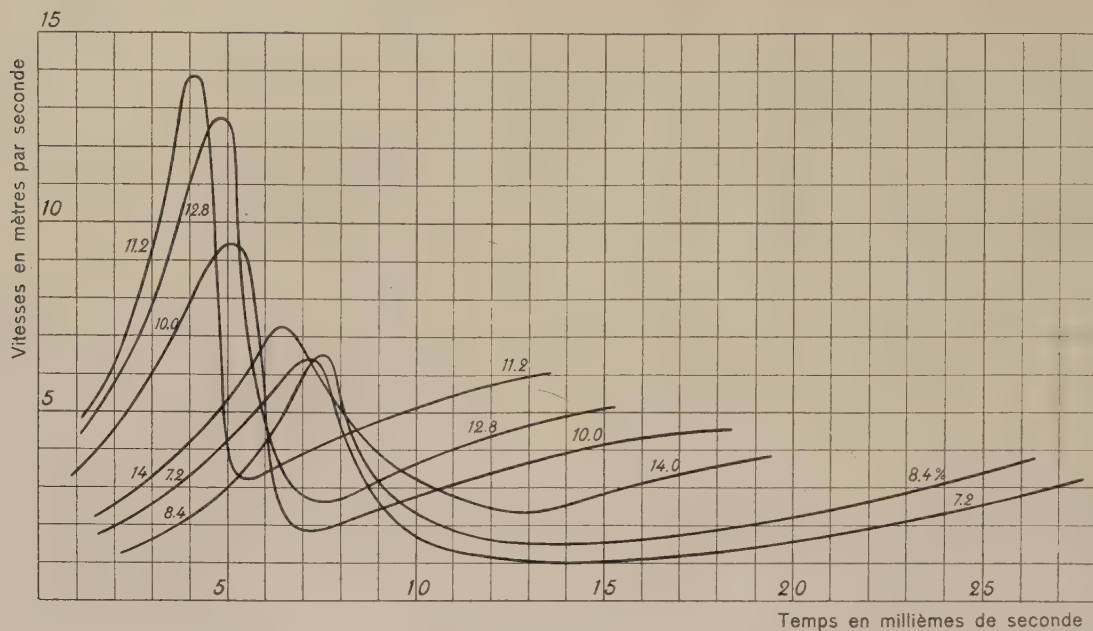
CONDITIONS EXPÉRIMENTALES : B

Le mélange à 7,2 % donne une propagation très peu lumineuse et pour les mélanges plus pauvres on n'a aucune inscription.

Nous n'avons pas dépassé, dans cette série d'essais, la richesse 14 %, mais ce chiffre est bien inférieur à la limite supérieure de propagation.

Dans ces conditions expérimentales, et à l'inverse de ce qui se passe avec les

conditions A , le noircissement photographique est progressif (voir influence de l'étincelle électrique n° 14).

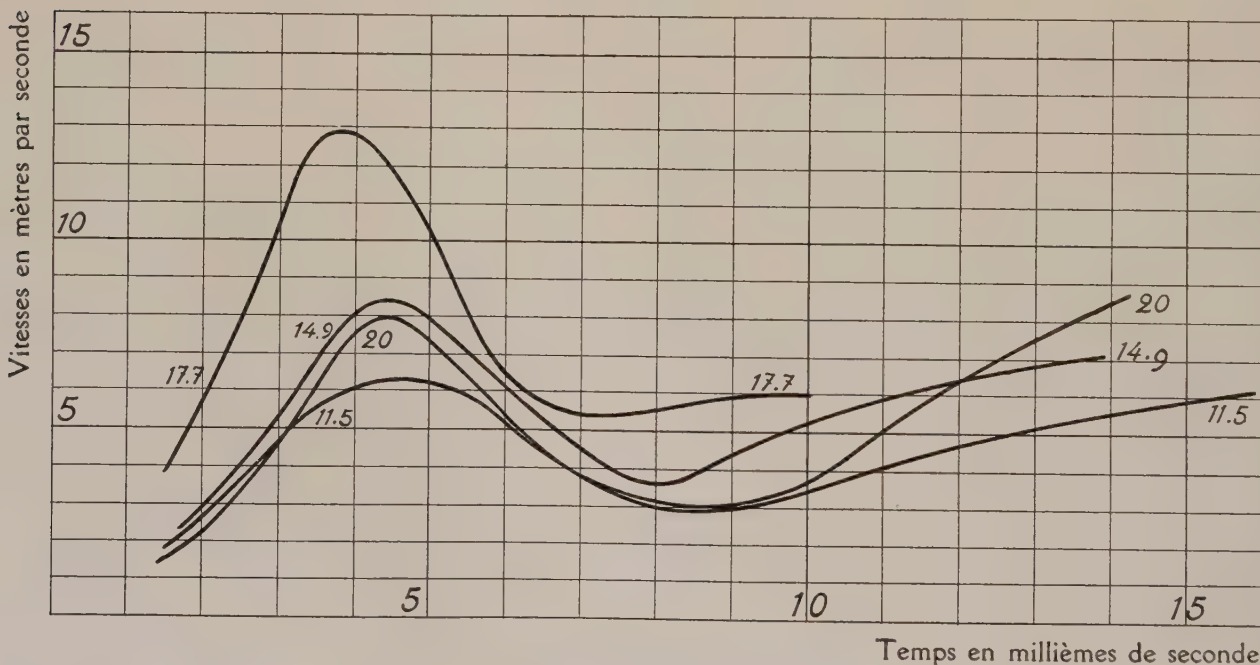


(Fig. 15) CYCLOHEXANE

Courbes donnant pour diverses concentrations les vitesses du front de flamme en fonction du temps

19) Cyclohexène C_6H^{10} $d_0 = 0,8089$ (fig. 16).

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES : A (définies ci-dessus)



(Fig. 16) CYCLOHEXÈNE

Courbes donnant pour diverses concentrations les variations de la vitesse du front de flamme en fonction du temps

Le maximum de célérité est obtenu pour $c = 17,7$.

Comme pour le cyclohexane, le noircissement photographique est discontinu et présente l'aspect de la figure 12₂.

Certaines photos montrent nettement des propagations par réflexion faisant suite à la première traversée du tube par la flamme, on en distingue deux successives et de sens contraire (Planche I, photo 1).

CYCLOHEXÈNE

Photo 1

$c = 17,7$

$r = 4,5$

Photo 2

$c = 20$

$r = 4,5$

HEXANE N

Photo 3

$c = 10,7$

$r = 4,5$

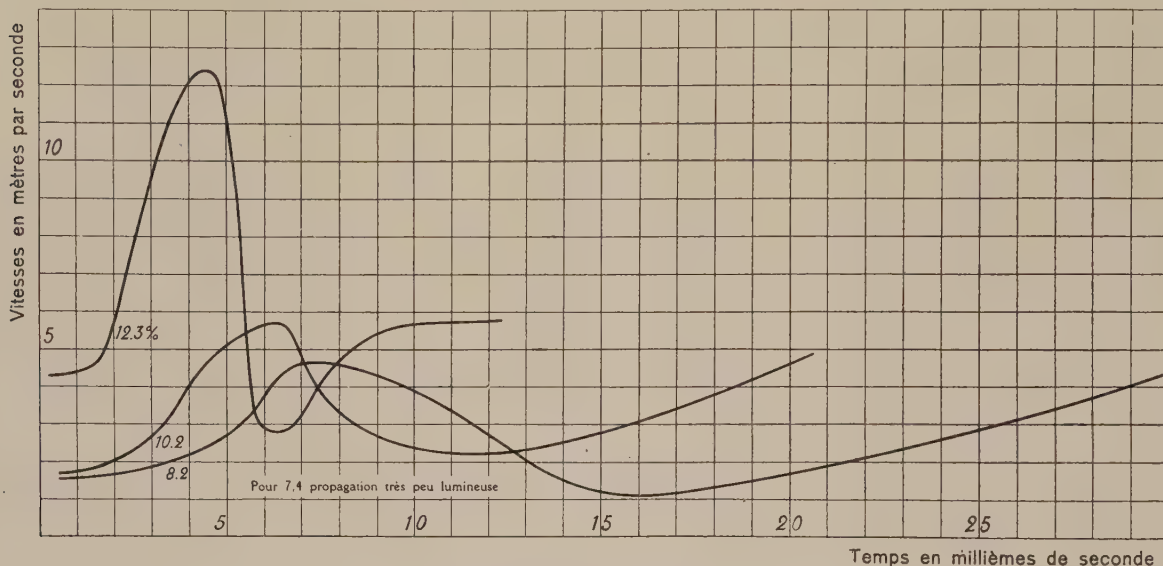
On est donc amené à penser que la luminosité qui s'établit dans le tube après la première traversée résulte de propagations successives, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, au cours desquelles s'achève la combustion.

La durée totale de la luminosité est comprise entre 28 et 37 millièmes de seconde.

20) Cyclohexène (fig. 17).

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES : B (définies ci-dessus).

Alors que dans les conditions expérimentales A la propagation ne s'établissait pas au-dessous de la richesse de 11,5 %, on voit que dans les conditions B, il y a propagation pour la richesse de 8,2 %.



(Fig. 17) CYCLOHEXÈNE

Courbes donnant les variations de la vitesse du front de flamme en fonction du temps

Cette différence provient de la différence d'énergie de l'étincelle électrique dans les deux cas (voir n° 14).

La richesse 12,3, pour laquelle on donne une courbe, ne correspond nullement à une limite supérieure d'inflammabilité.

21) Hexane C_6H_{14} $d_{17} = 0,663$.

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES : A

Nous ne donnons pas pour ce carbure, dans ces conditions expérimentales, un graphique analogue aux précédents, car, les photos sont trop pâles, du moins pour la partie correspondant à la traversée du tube par le front, pour permettre des déterminations exactes en tous les points. On trouvera néanmoins dans le tableau ci-après quelques valeurs numériques qui ont pu être relevées.

Les photos, sauf la première, sont du type de la figure 12₂, avec noircissement brusque.

Les propagations succédant à la première sont bien marquées, alors que la première est extrêmement pâle (Planche I, photo 3).

Le resserrement des limites de propagation est dû à la faible énergie de l'étincelle électrique (1).

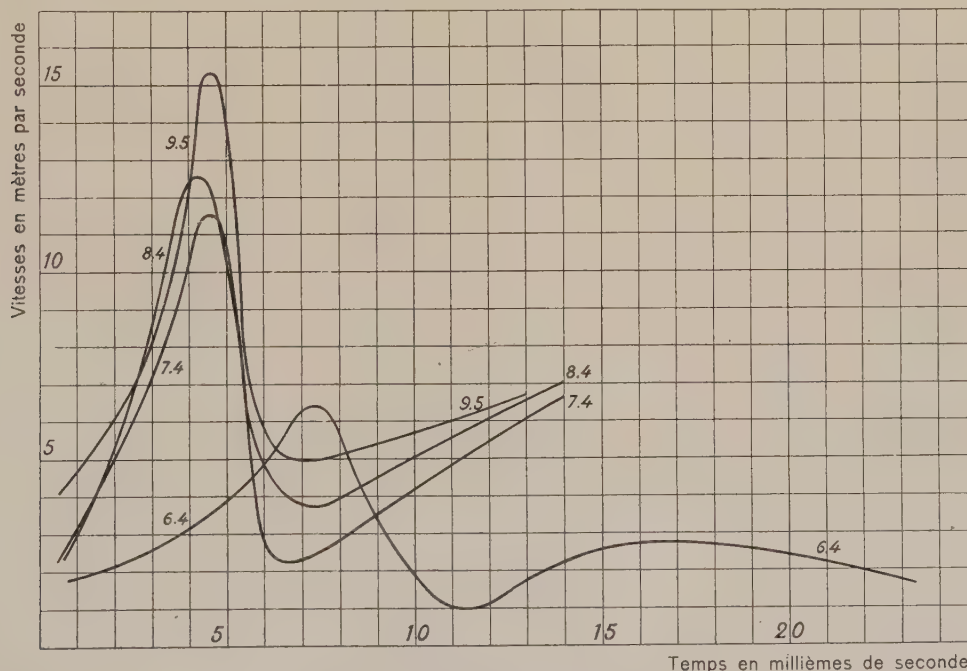
(1) Ces résultats expérimentaux viennent confirmer les essais de W. M. THORNTON (Proc. Roy. Soc. London, 1914, 90, 272, 297) qui signalent le resserrement des limites d'inflammabilité du méthane et de quelques homologues avec l'abaissement de l'intensité du courant primaire de la bobine d'allumage.

CONCENTRATION C %.	DURÉE DE LA COMBUSTION en mill. de seconde		VITESSES en mètres par seconde				OBSERVATIONS TAUX DE COMPRESSION : 42
	TOTALE	de la TRAVERSÉE	AU BOUT de 2 mil. de seconde	MAXIMA	MINIMA	MOYENNE au cours de la traversée	
6,3							Mélange chimique; pas d'inflammation.
8,5							Pas de propagation.
8,7	26 à 27	12,5	6,8	10,1	4,4	6,1	L'intensité lumineuse de l'enregistrement croît progressivement.
10,7	30	16	4,6	8,3	2,7	4,8	Flamme très pâle sur presque toute la traversée du tube; propagation rétrograde très lumineuse vers l'extrémité, suivie d'une troisième propagation de même sens que la première.
11,6	25	14,5	4,6	8	2,7	5,3	Flamme très pâle; renforcement de l'intensité lumineuse après la traversée du tube.
13,1							Pas de propagation.

22) Hexane N C_6H_{14} .

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES : B (définies ci-dessus)

Dans ces conditions expérimentales, les limites de propagation sont beaucoup plus écartées et nous obtenons une courbe des vitesses pour la richesse 6,4 %.



(Fig. 18) HEXANE N.

Variations de la vitesse du front de flamme en fonction du temps, pour diverses concentrations

Sur le graphique ci-joint (fig. 18), on remarquera que les vitesses vont constamment en croissant avec la richesse du mélange, alors que pour les autres carbures étudiés la vitesse augmente d'abord avec la richesse, passe par un maximum, puis décroît.

Au-dessus de la richesse 9,5 %, on observe les faits suivants :

a) Avec 10,1 %, l'enregistrement est beaucoup plus pâle qu'avec 8,4 ou 9,5, bien que la violence de la déflagration (recul en arrière du mouton) ne soit pas moindre dans ce cas

que dans les deux autres. La courbe donnant le déplacement du front par rapport au temps est sensiblement la même que pour la richesse 8,4.

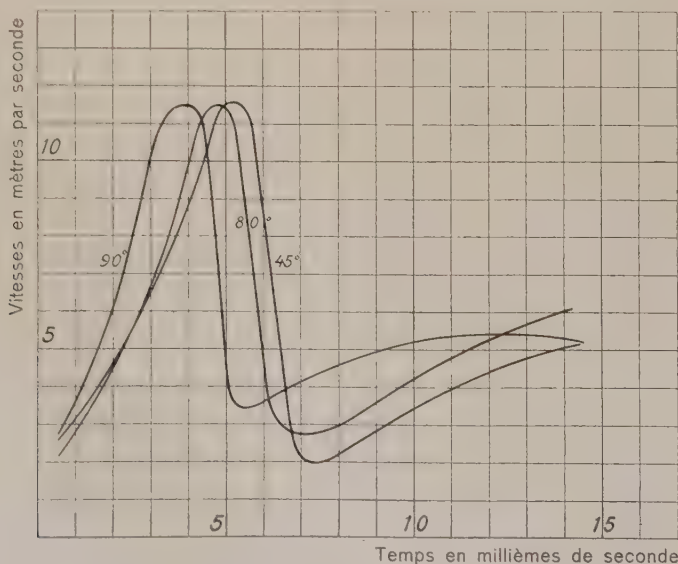
b) Avec 12,8 %, on n'a plus aucun noircissement appréciable sur le film et aucune trace de propagation, bien que la violence de la déflagration soit au moins égale à celle obtenue pour la richesse 10,1 ⁽¹⁾.

Il y a donc propagation violente sans émission de rayons photogéniques; nous revenons sur ce point au Chapitre suivant.

24) Influence de la température initiale du mélange gazeux.

Les essais ont été faits sur du benzène et de l'hexane; pour le premier de ces hydrocarbures, nous donnons ci-dessous un tableau permettant de comparer les inscriptions obtenues à 55°, 70° et 85°; pour l'hexane, nous donnons un graphique (*fig. 19*) des vitesses en fonction du temps, les essais pour ce carbure ayant été faits dans les conditions expérimentales B.

TEMPÉRA- TURE INITIALE avant compression	DURÉE en mill. de seconde		VITESSES en mètres par seconde			OBSERVATIONS
	de la COMBUST. totale	de la TRAVERSÉE du tube	MAXIMA	MINIMA	MOYENNE au COURS de la traversée	
17°		33			2	La propagation est très peu lumineuse et ne semble pas se poursuivre au delà de la traversée du tube.
40°	41	17,7	7	1,5	3,80	
55°	31	11,1	12	4	6	Enregistrement bien marqué à noircissement progressif. (Voir la reproduction de ces photos <i>planche II</i>)
70°	28	11,3	12,5	2,5	6	
85°	32	11,1		2,5	6	



(Fig. 19) HEXANE (Influence de la température initiale)

Variations de la vitesse de propagation du front de flamme en fonction du temps par diverses températures initiales

On voit, d'après ce tableau :

1° Que la propagation s'établit mal à la température ordinaire et qu'elle est peu rapide.

(1), C. R. t. 187, 1928, p. 200.

PHOTOS
OBTENUES
AVEC UN
MÊME MÉLANGE
DE BENZÈNE
ET D'AIR

$$c = 0,14$$

$$r = 5$$

Photo 1

$$t_0 = 55^{\circ}$$

Photo 2

$$t_0 = 70^{\circ}$$

Photo 3

$$t_0 = 85^{\circ}$$

2° Que la vitesse de propagation s'accroît avec la température, mais que cet accroissement cesse rapidement.

Entre 55° et 85°, la température initiale du mélange apparaît sans grande influence.

Les courbes ci-dessus (fig. 19) n'indiquent pas de variations sensibles de la vitesse avec la température : les vitesses moyennes sont, en effet, les mêmes puisque la durée nécessaire au front de flamme pour traverser le tube est la même et on voit, d'autre part, que les vitesses maxima atteintes sont égales.

Le temps au bout duquel cette vitesse maxima est atteinte semble diminuer lorsque la température augmente, nous essayerons au Chapitre suivant de donner une explication de ce phénomène.

25) Influence du taux de compression r .

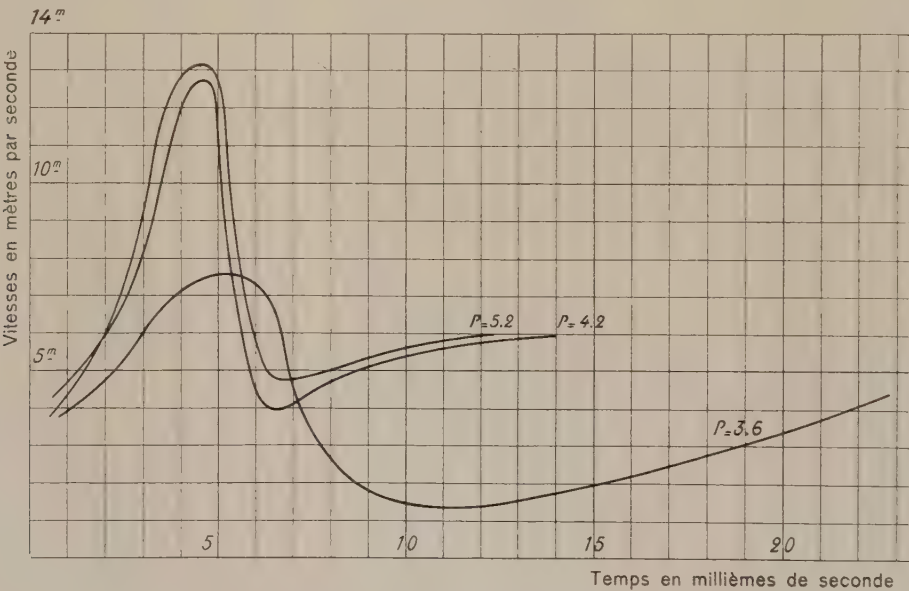
Le volume final v restant le même au cours des essais, nous avons fait varier le volume initial V en opérant avec la même richesse de mélange, les autres conditions expérimentales restant, bien entendu, les mêmes d'un essai à l'autre.

Nous donnons ci-après (fig. 20) un graphique résumant les essais faits avec le cyclohexane.

L'augmentation du taux de compression :

1° Diminue le temps nécessaire au front de flamme pour traverser le tube, autrement dit, augmente la vitesse moyenne.

2° Augmente la valeur de la vitesse maxima tout en diminuant légèrement le temps au



(Fig. 20) CYCLOHEXANE (Influence du taux de compression)

$$r = \frac{V}{v} \quad \text{richesse du mélange : 15 \%}$$

bout duquel elle est atteinte.

D'autres essais ont été faits avec de l'hexane et ont donné les résultats suivants qui confirment les précédents.

TAUX DE COMPRESSION r	DURÉE en millièmes de seconde		VITESSES		
	TOTALE de la combustion	DE LA TRAVERSÉE du tube par le front de flamme	MAXIMA	MINIMA	MOYENNE
3,1	> 30	12,5	8 m. 9	1 m. 8	6 m. 1
5,1	25	10,7	10 m. 5	2 m. 3	7 m. 2

26) Influence du plomb-tétréthyle.

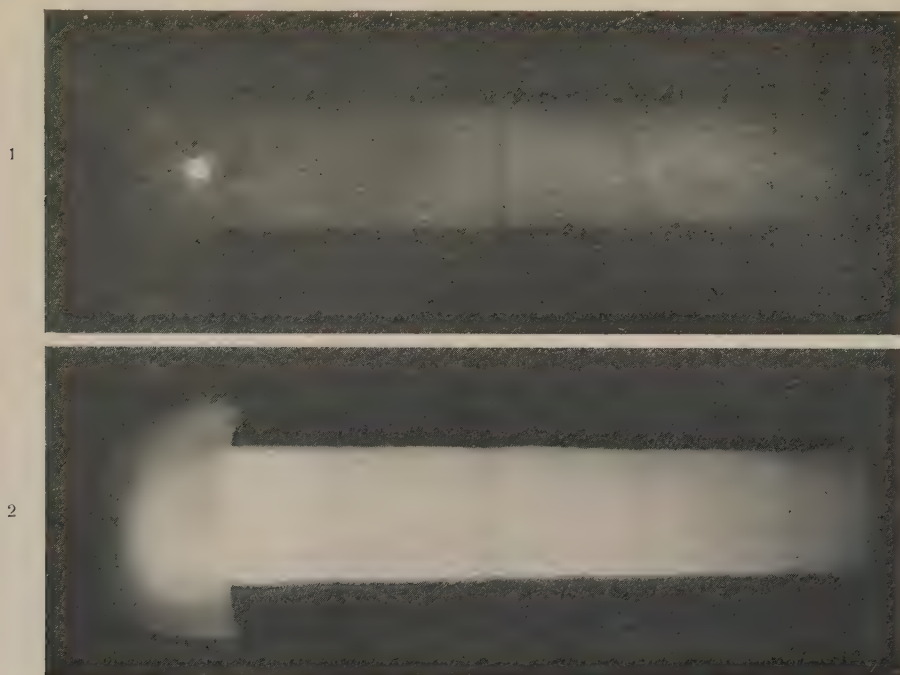
Nous avons tout d'abord essayé l'action du plomb tétréthyle sur une propagation discontinue du type indiqué par la *figure 12*, c'est-à-dire présentant une brusque augmentation d'intensité lumineuse actinique.

A cet effet, nous avons préparé des mélanges de cyclohexane et de plombtétréthyle avec 1 et 2 % de ce corps (évalué par rapport au mélange). Nous donnons (Pl. III) la reproduction des photos obtenues. On observe que la naissance de la luminosité intense est de moins en moins brusque quand la proportion de plomb-tétréthyle augmente ⁽¹⁾.

Cette particularité conduit à penser que l'anti-détonant intervient pour assurer une plus grande continuité dans la succession des diverses phases de la réaction.

D'autre part, nous avons signalé que dans les conditions expérimentales B, avec un mélange d'hexane à 12,8 %, toute inscription photographique disparaît, bien que la déflagration se produise avec une violence au moins égale à celles pour lesquelles on obtient des inscriptions très marquées.

L'adjonction de 5 % de plombtétréthyle au carbure fait réapparaître l'inscription sur le film ⁽²⁾. Si la disparition de radiations photographiquement actives peut être attribuée à l'établissement du régime détonant ⁽³⁾, il semble démontré ainsi que le plomb tétréthyle, en milieu gazeux homogène, retarde l'apparition de ce régime.



(Fig. 20 bis)

- (1) Impressions reçues sur une plaque photographique fixe lors de la déflagration d'un mélange carburé d'hexane à 12,8 %
- (2) Photographie dans les mêmes conditions que ci-dessus, mais l'hexane employé renfermait 5 % de plombtétréthyle

La *figure 20 bis* permet de comparer les émissions différentes de rayons actiniques suivant que l'on opère sans ou avec antidétonant.

27) Influence de la longueur du tube d'explosion.

L'influence de la longueur du tube semble se manifester sur le temps au bout duquel le maximum de vitesse est atteint. Plus le tube est court, plus ce maximum est atteint rapidement.

(1) C. R. Ac. Sc., t. 186, 1928, p. 220.

(2) C. R. Ac. Sc., t. 187, 1928, p. 200.

(3) Cette assertion semble nettement résulter des travaux de HENNE et CLARK, *Spectrographie de flammes dans un moteur à explosion*, C. R. Ac. Sc., t. 184, 1927.

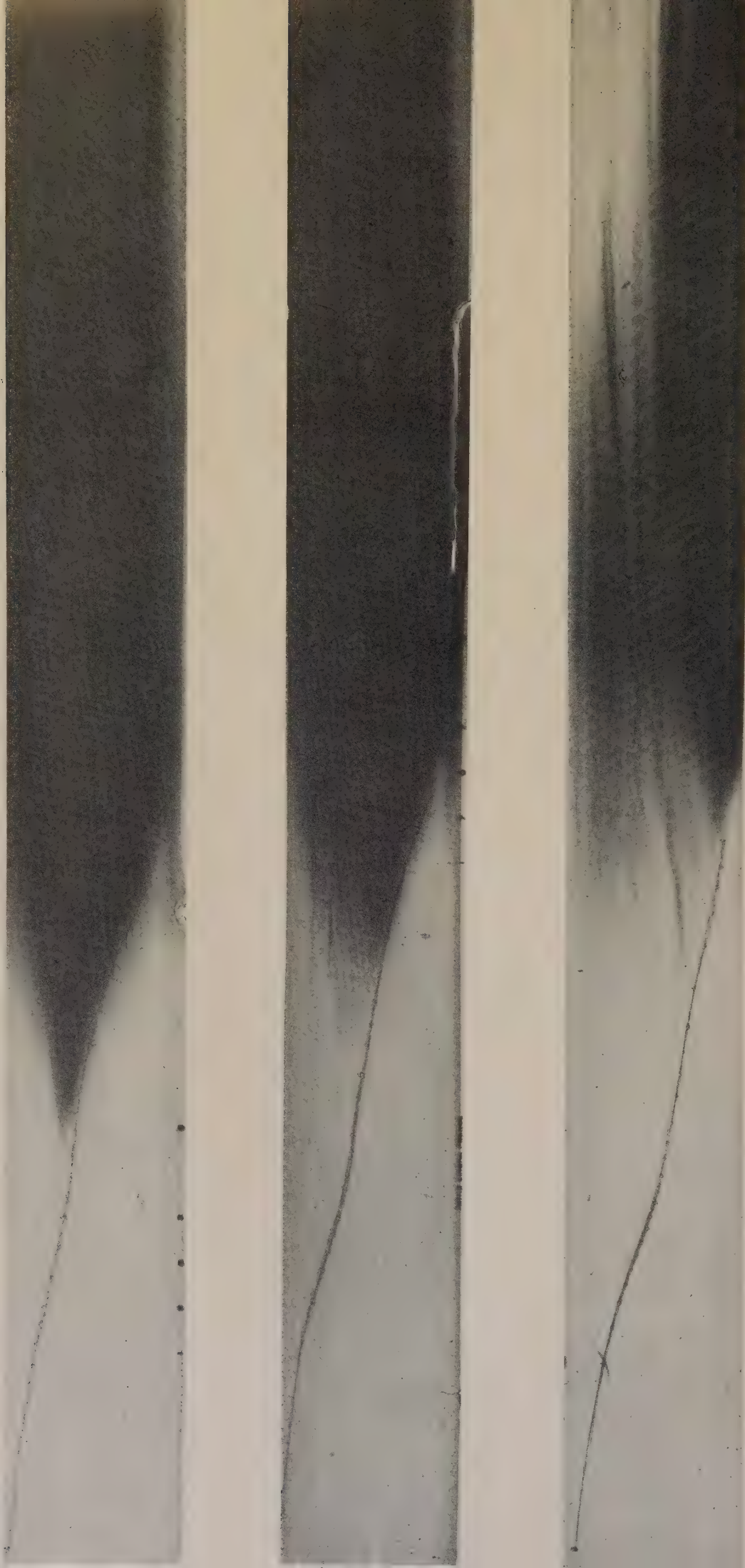
CYCLOHEXANE

INFLUENCE
DU PLOMB
TÉTRA-ÉTHYLE

Photo 1
Sans plomb
tétra-éthyle

Photo 2
1 % de plomb
tétra-éthyle

Photo 3
2 % de plomb
tétra-éthyle



C'est ce qui apparaît sur les graphiques : 14 et 15 relatifs au cyclohexane, 16 et 17 relatifs au cyclohexène.

Nous tenterons au Chapitre suivant un essai d'explication de ce phénomène.

28) Remarque.

Au cours de nos essais, nous avons remarqué accidentellement, mais à plusieurs reprises, que si une ou plusieurs étincelles *successives* passent dans le mélange immédiatement après l'allumage, la flamme n'ayant encore franchi qu'une fraction de la longueur du tube, la vitesse de propagation est retardée.

L'allure de la courbe de propagation est évidemment la même à son début dans les deux cas, mais il semble que les étincelles faisant suite à celle d'allumage ont pour effet de prolonger la période de vitesse minima. La courbe devient presque parallèle aux bords du film et cela pendant un temps d'autant plus long que la série d'étincelles comprend plus d'unités. Ce ralentissement, qui équivaut presque à un arrêt du front, dure de 1 à 2 centièmes de seconde lorsqu'il passe trois étincelles successives à des intervalles de $4/1.000$ de seconde.

CHAPITRE IV

DISCUSSION des PRÉCÉDENTS RÉSULTATS

29) Aspect des courbes.

On peut se demander si la forme ondulée de la courbe de propagation du front n'est pas due à des circonstances accidentelles, autrement dit, si elle ne dépend pas des dispositifs de compression et d'allumage ou encore du retour en arrière du piston sous l'influence de la déflagration.

Le temps d'arrêt du piston en fond de course est généralement bien supérieur au temps de propagation du front de flamme sur la longueur du tube. Ce temps d'arrêt est de l'ordre de $1/50$ de seconde pour les *déflagrations les plus vives*, alors que la traversée du tube s'effectue en un temps moindre, de l'ordre de $8/500$ de seconde.

Le dispositif expérimental employé pour cette détermination consistait à faire fermer un circuit électrique par le mouton compresseur quand celui-ci avait fourni la compression maxima. Le temps de fermeture du circuit était enregistré sur un tambour tournant sur lequel s'inscrivait également le temps.

Comme preuve complémentaire, nous donnons la reproduction d'une photographie obtenue au cours d'un essai où le tube de verre a éclaté avant que le piston et le mouton ne repartent en arrière. On voit que non seulement la flamme a eu le temps de traverser le tube, mais on voit le tube illuminé totalement pendant plusieurs millièmes de seconde (Pl. 4).

Pour déterminer l'influence du choc du mouton sur le piston, nous avons pris des photographies en poussant le piston sans choc ; l'allure générale de la courbe n'est pas modifiée.

L'étincelle étant produite par le mouton à l'arrivée du piston en fond de course, l'allumage a lieu un instant très court avant la compression maxima, autrement dit, tous les essais ont été faits avec une légère « avance à l'allumage ». Nous avons déterminé l'allumage à la main après compression totale ; aucune modification d'allure générale n'a été observée.

Il est évident d'après ce que nous avons dit ci-dessus, relativement au temps d'arrêt du piston que le fait de laisser repartir vers l'arrière le piston, après la déflagration, n'a pas d'influence sur l'enregistrement de la propagation. Nous avons, d'ailleurs, arrêté le piston dans sa course rétrograde sans constater de modifications.

C'est donc le fait de déterminer une déflagration en tube court et clos qui donne à la propagation l'allure générale indiquée.

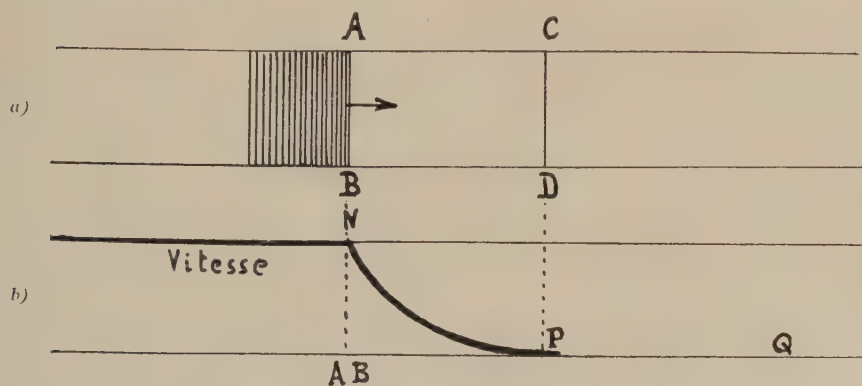
Il a été signalé au Chapitre I que M. Le Chatelier avait trouvé que l'allumage auprès de l'extrémité fermée d'un tube donnait lieu à une propagation accélérée. C'est ce que nous constatons également au début de la propagation, mais cette accélération est diminuée rapidement dans nos expériences par la présence d'un second fond fermé contre lequel se produisent des réflexions.

M. Jouguet a bien voulu nous exposer ses conceptions sur ce sujet et nous nous permettons de les résumer ici.

Il a été mis en évidence par les expériences faites en galeries de mines ⁽¹⁾ que toute déflagration est précédée d'un ébranlement purement mécanique que l'on a dénommé « chasse préalable » ⁽²⁾.

Cet ébranlement se produit dans notre tube dès la naissance de la déflagration et se propage dans les gaz au repos par une surface d'onde CD avec la vitesse du son (fig. 21 a). Toutefois, il ne s'agit pas ici de l'établissement d'un mouvement vibratoire, mais simplement de la propagation d'un ébranlement comme celui que crée une pierre en tombant dans l'eau.

La figure 21 b indique, à un instant donné, la loi de la vitesse des diverses tranches.



(Fig. 21)

La vitesse est petite sur une assez grande étendue avant la surface d'onde CD et, par suite, la courbe MNP doit être très voisine de l'axe des x sur une bonne partie de l'arc NP. Ce ne serait sans doute qu'au voisinage immédiat de N que cette courbe se relèverait.

La flamme avance avec une vitesse de quelques mètres par seconde; la tranche CD avance avec une vitesse de l'ordre de 350 mètres. La distance AC s'allonge donc avec le temps.

Si le tube est fermé, la chasse préalable ABCD se réfléchit sur les fonds et trouble la propagation de la flamme. Dans le cas expérimental qui nous occupe, la chasse préalable aurait le temps de se réfléchir vingt-cinq fois pendant que la flamme parcoure le tube une seule fois.

Pendant les premiers instants de la propagation de la flamme, ces réflexions modifient peu le milieu dans lequel la flamme se propage (puisque la vitesse est très faible aux environs de CD). Au voisinage de la flamme et avant celle-ci, il y a translation des tranches gazeuses et, par suite, augmentation de la vitesse relative du front de flamme. C'est ce qui expliquerait l'accélération initiale constatée.

Lorsque la zone NI, précédant le front de flamme, atteint l'extrémité fermée du tube, la chasse préalable se réfléchit, les vitesses changent de signe, et elle diminue la vitesse apparente du front de flamme. Ce serait là l'explication de la diminution de vitesse de ce front.

Puis, par le jeu des réflexions successives, la pression s'égale et la flamme prend la vitesse sensiblement uniforme ou uniformément variée que l'on observe vers la fin de la traversée du tube.

PLANCHE IV

Le front de flamme a nettement traversé le tube avant l'éclatement

(1) M. TAFFANEL.

(2) M. JOUGUET, *Mécanique des explosifs*.

30) La réaction se produirait par phases successives.

Nous avons signalé au Chapitre précédent § 14 qu'il a été obtenu, dans certaines conditions expérimentales, des photographies où à un faible noircissement succédait brusquement une plage très foncée indiquant une modification dans la déflagration. Cette propagation, très actinique, qui se produit aussi bien dans les gaz frais que dans les gaz brûlés, pourrait bien correspondre à une nouvelle réaction chimique. S'il ne s'agissait que d'une modification quantitative de la même réaction chimique, il n'est pas vraisemblable qu'elle offrirait une transition aussi brusque.

Les différents passages de la flamme à travers le tube, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, et que nous avons signalés à propos des essais sur le cyclohexène et l'hexane dans les conditions expérimentales A (étincelle de faible énergie) ne correspondent-ils pas également à des phases intermédiaires de la réaction chimique ?

A l'appui de ce point de vue rappelons que, dans les combustions lentes d'hydrocarbures, divers chercheurs ont signalé la formation de composés intermédiaires. C'est ainsi que Callendar ⁽¹⁾, ayant soumis de l'hexane à une combustion lente, a trouvé qu'il se forme des aldéhydes en abondance : aldéhydes formique, acétique et valérique entre autres.

Suivant Bone, un hydrocarbure quelconque soumis à la combustion lente possède une tendance naturelle à la transformation des atomes H en groupes OH, avec dégagement de chaleur. C'est la théorie de l'hydroxylation qui semble confirmée par les expériences récentes de Landa ⁽²⁾.

La formation de composés intermédiaires, tels que des carbures hydroxyles ⁽³⁾ paraît, du point de vue de la théorie atomique, infiniment plus probable que la formation directe immédiate de CO² et de H² O qui nécessiterait un concours extraordinaire de chocs atomiques ⁽⁴⁾.

31) Limite d'inflammabilité.

Dans les séries d'essais, dont on a donné le compte rendu au Chapitre précédent, la richesse du mélange a été diminuée progressivement jusqu'à la disparition de toute inscription sur le film.

Les courbes de propagation données pour les concentrations les plus faibles de chaque série de courbes (*fig.* 13, 15, 17 et 18) ont été obtenues avec des richesses en carbure à peine supérieures à la richesse pour laquelle aucun noircissement n'était observé.

On pourrait supposer que dans ce dernier cas, s'il n'y a pas d'émission de radiations actiniques suffisamment intenses, il y a néanmoins propagation. S'il en était ainsi, la déflagration produirait une action mécanique (retour plus brusque du piston que lorsque la charge est de l'air non carburé). Or, pour les mélanges peu riches, dont il est question, toutes les fois que nous n'avons eu aucun noircissement photographique, nous n'avons observé aucune action mécanique. Nous concluons donc qu'il n'y a pas de déflagration lorsque pour ces mélanges nous n'avons pas obtenu d'enregistrement.

Or, ces richesses limites sont encore relativement grandes, puisqu'elles sont voisines de la richesse du mélange chimique; elles sont supérieures à la limite inférieure d'inflammabilité donnée par les auteurs.

Nous donnons dans le tableau ci-dessous, pour chaque carbure, d'une part, la composition correspondant à l'équation chimique brute et, en face, les limites expérimentales entre lesquelles se trouve comprise la limite inférieure d'inflammabilité.

(1) *Engineering*, 223, 1927, p. 147, 182, 210.

(2) LANDA, C. R. Ac. Sc., 27 février 1928, p. 589.

(3) Réactions bimoléculaires.

(4) Dans le cas de la combustion du benzène, il faudrait l'union simultanée de dix-sept molécules si la transformation se faisait directement en CO² et H²O.

CARBURES	COMPOSITION DU MÉLANGE correspondant A L'ÉQUATION CHIMIQUE BRUTE (en poids)	LIMITE INFÉRIEURE DE PROPAGATION déterminée expérimentalement (% en poids)
Benzène	7,6 %	$6,9 < c \leq 7,5$
Cyclohexane	6,5	$6,7 < c \leq 7,2$
Cyclohexène.....	6,7	$7,6 < c \leq 8,2$
Hexane	6,3	$5,9 < c \leq 6,4$

Si nous calculons la consommation d'un moteur à explosion en prenant l'un des chiffres ci-dessus (la cylindrée et le nombre de tours étant connus), on trouve un chiffre notablement plus élevé que celui correspondant à la consommation réelle. Les déflagrations dans un cylindre de moteur à explosion se feraient donc avec une richesse de mélange moindre que celle que nous donnons ci-dessus comme limite inférieure.

Il ne faut toutefois pas perdre de vue que le mélange dans un moteur à explosion n'est pas sous la seule phase gazeuse, mais contient des brouillards en suspension; d'autre part, ce mélange n'a rien d'homogène. Ce sont donc là des conditions différentes de celles dans lesquelles nous avons opéré.

D'après les essais de M. Pignot ⁽¹⁾, l'auto-allumage par compression adiabatique se produirait même pour des mélanges bien plus pauvres que ceux que nous indiquons; mais, dans ce cas, on conçoit que l'énergie nécessaire à la propagation doit être très faible, puisque tous les points du mélange sont portés à la fois à une température très voisine du point d'inflammation.

32) Déflagration et détonation.

Nous avons signalé au paragraphe 3 l'hypothèse qui consiste à admettre que l'onde explosive s'établit lorsqu'il y a coïncidence, en tout point de la masse combustible, de la réaction chimique et d'une onde mécanique (onde de choc et combustion). Cette hypothèse a permis d'établir des formules qui ont donné des valeurs numériques se rapprochant remarquablement des valeurs expérimentales données par Vieille, Le Chatelier et Dixon ⁽²⁾.

Il semble logique d'admettre que cet état de choses est un état « limite » et que l'on doit trouver toute une série de propagations où l'onde mécanique précède l'onde de réaction chimique (flamme).

La première pourrait, en effet, à partir du moment où elle propage une certaine énergie, participer à la réaction chimique et, par suite, modifier d'autant la seconde qui la suit. A chaque dosage de ces deux réactions correspondra une déflagration différente.

Plus l'onde de choc serait condensée, plus la température de chaque tranche serait élevée par le passage de l'onde mécanique et plus la première réaction chimique serait importante. La flamme qui suit aurait une importance d'autant plus faible que la réaction aurait été plus importante au passage de l'onde de choc.

La réaction complète au passage de l'onde de choc constituerait l'onde explosive, ne laissant aucune flamme derrière elle.

Ces considérations nous semblent étayées par nos essais avec des mélanges de plus en plus riches en hexane. Nous avons dit, en effet, qu'avec la richesse 8,4 nous obtenons un enregistrement très marqué; avec la richesse 10,1, l'enregistrement est pâle sans que l'effet mécanique soit moindre; avec la richesse 12,8, il n'y a plus d'enregistrement, bien que la violence de la déflagration soit au moins aussi intense.

(1) PIGNOT, Thèse de Doctorat, *Bulletin Technique de l'Aéronautique*, n° 34, mai 1926.

(2) JOUGUET, *Mécanique des explosifs*, p. 333.

D'autre part, MM. Henne et Clark ⁽¹⁾ ont signalé que l'établissement de l'onde explosive dans un cylindre avait pour effet d'émettre des rayons dont le spectre s'étend dans l'ultra-violet jusqu'à 2.360 Å, alors que le spectre produit par une déflagration ne s'étend que jusqu'à 3.400 Å.

Il semble donc que nous puissions attribuer notre perte d'impression photographique à l'établissement du régime détonant, les rayons émis étant alors arrêtés par le verre du tube et de l'objectif.

Le premier essai rappelé ci-dessus correspondrait à une déflagration normale; le second à une déflagration atténuée du fait du passage d'une onde condensée en avant de la flamme; la troisième, enfin, correspondrait à une propagation détonante.

33) Rôle des anti-détonants.

Le plomb tétréthyle a pour effet de ramener les radiations lumineuses dans les limites du spectre visible, comme il est exposé au paragraphe 26. L'anti-détonant s'opposerait donc, si l'on admet l'hypothèse développée ci-dessus, à l'action chimique de l'onde de choc qui précède la flamme.

Nous avons vu également que le plomb tétréthyle semble s'opposer à l'établissement de la *réaction brusque* qui se produit au cours de la déflagration dans certaines conditions expérimentales (paragraphe 26 et planche III). Il nous paraît intéressant de rapprocher ce résultat de ceux obtenus récemment par Callendar ⁽²⁾ qui attribuent le régime détonant à la formation de peroxydes qui se décomposeraient par la suite avec violence. D'après cet auteur, la présence d'anti-détonants s'opposerait la formation de ces peroxydes.

34) Remarques sur l'existence de la « chasse préalable ».

Nous avons signalé au paragraphe 27 que dans un tube long le maximum de vitesse était atteint au bout d'un temps plus long que dans un tube plus court.

Si la « chasse préalable » est bien la cause de l'arrêt de la vitesse accélérée du début de la propagation, il est évident qu'elle s'opposera à cette propagation, d'autant plus tard qu'elle aura parcouru un chemin plus long, autrement dit, que le tube sera plus long. Cette conclusion est d'accord avec le fait rappelé ci-dessus.

Nous avons également signalé (paragraphe 24) que le maximum de vitesse de propagation était atteint d'autant plus rapidement que la température initiale était plus élevée.

La chasse préalable, que nous supposons déterminer l'arrêt de la propagation accélérée du début, se propagerait donc plus rapidement lorsque la température du milieu est plus élevée. Si cette chasse est bien un ébranlement mécanique elle doit, en effet, se propager plus rapidement dans un milieu plus chaud comme il en est pour le son.

(1) A. HENNE et G. L. CLARK, C. R. Ac. Sc., t. 184.

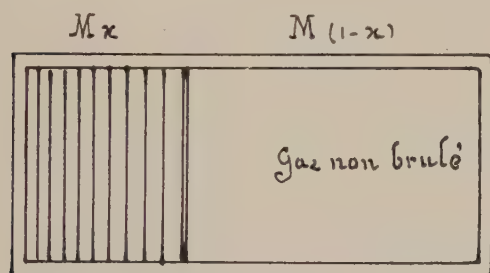
(2) *Engineering*, 4 fév. 1927, p. 147.

ÉTUDE ANALYTIQUE de la PROPAGATION dans un MÉLANGE COMBUSTIBLE RENFERMÉ dans un TUBE FERMÉ

35) Hypothèses.

Considérons un cylindre fermé à ses deux extrémités et contenant un mélange combustible susceptible d'être enflammé à une des extrémités.

Nous allons suivre pour ce calcul la même marche que celle adoptée par Mache ⁽¹⁾ pour étudier la propagation dans une sphère, l'allumage étant produit au centre de la sphère.



(Fig. 22)

Nous supposons que la propagation se fait par tranches perpendiculairement à l'axe du cylindre.

La vitesse de propagation est telle qu'il ne se fait pas d'échanges de chaleur d'une tranche à l'autre ⁽²⁾, pas plus d'ailleurs qu'entre les gaz brûlés et les gaz non brûlés ou entre gaz et parois.

La pression est supposée s'égaliser instantanément.

Les diverses tranches brûlées ne sont pas à la même température, ce qui est rationnel puisqu'une tranche quelconque prise dans les gaz vierges va se trouver comprimée jusqu'au moment de sa combustion. Plus elle aura été comprimée, plus sa température sera élevée au moment de la combustion. En revanche, tous les gaz brûlés sont à la même température.

Ni remous, ni dissociation et pas de régime détonant.

36) Relations entre les chaleurs spécifiques à pression constante, avant la combustion ($C'_{(p)}$), et après ($C''_{(p)}$).

Considérons un mélange gazeux combustible à la température T'_0 . Si on détermine la combustion de ce mélange à pression constante, sa température va devenir T''_0 , la chaleur produite par la combustion étant $Q_{0(p)}$ (chaleur de combustion).

Si, avant de déterminer la combustion nous amenons le mélange à la température T' , la température après combustion sera T'' .

Nous avons la relation, d'après le principe de l'état initial de l'état final :

$$Q_{0(p)} = \int_{T'_0}^{T''_0} C''_{(p)} dT = \int_{T'_0}^{T''} C''_{(p)} dT - \int_{T'_0}^T C'_{(p)} dT$$

(1) Dr Heinrich MACHE, *Die Physik der Verbrennungserscheinungen*, Leipzig, 1918.

(2) Cette hypothèse, qui est faite pour les besoins du calcul, semble en contradiction avec ce qui a été dit des déflagrations au § 4; la transmission de chaleur d'une tranche à l'autre contribue, en effet, à la propagation mais l'élévation de température, due à la compression, subsiste néanmoins.

La seconde égalité peut s'écrire :

$$\int_{T''_0}^{T''} C''_{(p)} dT = \int_{T'_0}^{T'} C'_{(p)} dT \quad .$$

Si on suppose que les chaleurs spécifiques sont des constantes, on aura :

$$C''_{(p)} (T'' - T''_0) = C'_{(p)} (T' - T'_0) \quad ,$$

que l'on peut encore écrire :

$$(1) \quad C''_{(p)} T'' - C'_{(p)} T' = C''_{(p)} T''_0 - C'_{(p)} T'_0 = K \quad .$$

C'est là une relation entre la température initiale et la température de combustion à pression constante.

37) Établissement d'une relation entre la fraction brûlée du mélange et la pression.

Posons $x = \frac{m}{M}$, m étant la masse entrée en combinaison à l'instant considéré.

x variera de 0 à 1 quand m variera de 0 à M .

Puisque $m = Mx$, la masse de la tranche élémentaire constituant le front de flamme sera : $dm = M dx$.

Son volume sera $v dm$, v étant le volume spécifique des gaz brûlés.

On pourra écrire :

$$(2) \quad V = \int_0^M v dm = M \int_0^1 v dx = M v_m \quad ,$$

v_m = volume spécifique moyen ou initial.

Dans les gaz non encore brûlés, on aura :

$$(3) \quad p^{\frac{1}{\gamma}} v' = F' = p_0^{\frac{1}{\gamma}} v_m \quad F' = \text{constante} \quad .$$

Dans les gaz brûlés, cette fonction adiabatique ne sera plus une constante, mais une fonction de x et on aura :

$$(4) \quad p^{\frac{1}{\gamma''}} v'' = F''(x) \quad .$$

Les grandeurs correspondantes sont marquées soit d'un accent ' , soit de deux '' suivant qu'elles ont rapport aux gaz non brûlés ou aux gaz brûlés.

On peut admettre que la combustion d'une tranche élémentaire se fait à pression constante. Nous pourrons, dès lors, appliquer l'équation (1), établie ci-dessus :

$$(1) \quad C'' T'' - C' T' = K \quad ,$$

T' = température initiale de la tranche considérée.

T'' = température de combustion de cette tranche.

On sait que :

$$C = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{R}{J}$$

$$C T = \frac{1}{J} \frac{\gamma}{\gamma - 1} p v = \frac{1}{J} \frac{\gamma}{\gamma - 1} p^{1-\frac{1}{\gamma}} F \quad .$$

L'égalité (1) devient alors :

$$\frac{\gamma''}{\gamma'' - 1} p^{1-\frac{1}{\gamma''}} F''_{(x)} - \frac{\gamma'}{\gamma' - 1} p^{1-\frac{1}{\gamma'}} F' = K J .$$

d'où :

$$(5) \quad F''_{(x)} = \frac{\gamma'' - 1}{\gamma''} p^{\frac{1}{\gamma''}-1} \left(K J + \frac{\gamma' - 1}{\gamma' - 1} p^{1-\frac{1}{\gamma'}} F' \right) .$$

C'est là une relation entre la valeur de F'' et la pression régnante p .

Recherchons une relation entre p et x .

Les équations (3) et (4) donnent :

$$v' = p^{-\frac{1}{\gamma'}} F' \quad v'' = p^{-\frac{1}{\gamma''}} F''_{(x)} .$$

L'équation (2) peut se mettre sous la forme :

$$\int_0^1 v \, dx = \int_0^x v'' \, dx + \int_x^1 v' \, dx = v_m .$$

Si l'on y remplace v'' et v' par les valeurs ci-dessus, il vient :

$$p^{-\frac{1}{\gamma''}} \int_0^x F''_{(x)} \, dx + p^{-\frac{1}{\gamma'}} F' \int_x^1 dx = v_m ,$$

d'où :

$$\int_0^x F''_{(x)} \, dx = v_m p^{\frac{1}{\gamma''}} - F' p^{\frac{1}{\gamma''}-\frac{1}{\gamma'}} (1-x) ,$$

en différenciant par rapport à x , on a :

$$(6) \quad F''_{(x)} = F' p^{\frac{1}{\gamma''}-\frac{1}{\gamma'}} + \left[\frac{1}{\gamma''} v_m p^{\frac{1}{\gamma''}-1} - \left(\frac{1}{\gamma''} - \frac{1}{\gamma'} \right) F' p^{\frac{1}{\gamma''}-\frac{1}{\gamma'}-1} (1-x) \right] \frac{dp}{dx} .$$

Cette équation ne renferme plus d'intégrale.

Si on rapproche cette équation de la relation (5), on a :

$$(7) \quad (\gamma'' - 1) K J = \frac{\gamma'' - \gamma'}{\gamma' - 1} F' p^{1-\frac{1}{\gamma'}} + \left[v_m + \frac{\gamma'' - \gamma'}{\gamma' - 1} F' p^{-\frac{1}{\gamma'}} (1-x) \right] \frac{dp}{dx} ,$$

relation entre x, p , $\frac{dp}{dx}$ qui peut s'écrire :

$$(\gamma'' - 1) K J = v_m \frac{dp}{dx} + \frac{\gamma'' - \gamma'}{\gamma' - 1} F' \frac{dp}{dx} \left[p^{1-\frac{1}{\gamma'}} (1-x) \right] .$$

Par intégration entre x et 1 , on a :

$$(\gamma'' - 1) K J (1-x) = v_m (p_1 - p) - \frac{\gamma'' - \gamma'}{\gamma' - 1} F' p^{1-\frac{1}{\gamma'}} (1-x) .$$

Pour $x = 0$, on a $p = p_0$, d'où :

$$(8) \quad p_1 = p_0 + \frac{1}{v_m} \left[\frac{\gamma'' - \gamma'}{\gamma' - 1} F' p_0^{1-\frac{1}{\gamma'}} + (\gamma'' - 1) K J \right] .$$

En introduisant cette valeur dans la relation précédente, on a :

$$(9) \quad (1-x) = \frac{v_m (p_1 - p)}{\frac{\gamma'' - \gamma'}{\gamma' - 1} F' p^{1-\frac{1}{\gamma'}} + (\gamma'' - 1) K J} ,$$

qui est la relation cherchée entre p et x .

Posons : $\pi = \frac{p}{p_0}$, il en résulte $\pi_1 = \frac{p_1}{p_0}$, et rappelons que $F' = p_0^{\frac{1}{\gamma'}} v_m$.

Posons :

$$H = \frac{K J}{R'} = \frac{K M' J}{R} .$$

où M' est le poids mol. du mélange.

R la constante univ. des gaz.

R' la constante rapportée à 1 gr.

On obtient alors :

$$(10) \quad \pi_1 = \frac{\gamma'' - 1}{\gamma' - 1} + (\gamma'' - 1) \frac{H}{T_0} ,$$

et :

$$(11) \quad (1-x) = \frac{\pi_1 - \pi}{\frac{\gamma'' - \gamma'}{\gamma' - 1} \pi^{1-\frac{1}{\gamma'}} + (\gamma'' - 1) \frac{H}{T_0}} .$$

Appelons V_x le volume occupé par les gaz brûlés lorsque la fraction x est entrée en combinaison. On a d'après ce qui précède (2) :

$$V - V_x = M \int_x^1 v' dx \quad \text{avec} \quad v' = \pi^{-\frac{1}{\gamma'}} v_m$$

$$V - V_x = M v' (1-x) = M v_m \pi^{-\frac{1}{\gamma'}} (1-x) = V \pi^{-\frac{1}{\gamma'}} (1-x) .$$

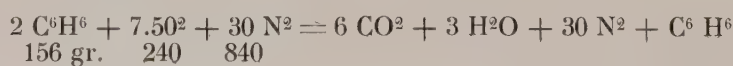
d'où, d'après (11) :

$$(12) \quad V_x = V \left[1 - \pi^{-\frac{1}{\gamma'}} \frac{\pi_1 - \pi}{\frac{\gamma'' - \gamma'}{\gamma' - 1} \pi^{1-\frac{1}{\gamma'}} + (\gamma'' - 1) \frac{H}{T_0}} \right] .$$

Nous allons essayer d'appliquer les formules (10), (11), (12) et d'obtenir dans le cas particulier du mélange de benzène et d'air, la valeur de π_1 et la façon dont π varie en fonction de x .

38) Calcul de K .

Considérons la réaction :



(Nous prenons un mélange riche comme ceux pour lesquels nous avons donné des vitesses de propagation).

La température initiale du mélange est T'_0 ; si la déflagration avait lieu à cette température, la température atteinte par le mélange serait T''_0 .

Mais nous réchauffons avant déflagration à T'_1 et la température après combustion sera T''_1 .

Nous avons vu précédemment que :

$$Q_0^{(p)} = C'' T''_0 - C' T'_0 \quad Q_0^{(p)} = \text{ch. de combustion à pression constante}$$

$$\text{et} \quad C'' T''_1 - C' T'_1 = C'' T''_0 - C' T'_0 = K$$

$$\text{d'où} \quad K = Q_0^{(p)} - (C' - C'') T'_0$$

Nous prendrons pour la chaleur de combustion : 9.545 cal. par gramme de benzène.

Dans un gramme du mélange, il entre en combustion $\frac{78}{1.236} = 0 \text{ gr. } 0630$ de benzène,

nous prendrons donc $Q_0^{(p)} = 0,063 \times 9.545 = 603$ calories.

La chaleur spécifique d'un mélange est donnée par :

$$C = \frac{\sum m C}{\sum m} .$$

Pour C' à $T'_0 = 273^\circ$, nous prendrons pour :

O_2	0,2056	Holborn et Henning
N_2	0,2350	— — —
C^2H^6	0,375	Aubert à l'état de vapeur entre 120 et 220°

Nous calculerons C'' à 2.000° par les formules de Pier valables entre 0 et 2.000° .

N_2	$0,2459 + 16,1 \times 10^{-6} \times 2.000$	0,278
CO_2	$0,1997 + 75 \times 10^{-6} \times 2.000 - 21,6 \times 10^{-9} \times \overline{2.000^2}$	0,281
H^2O	$0,4472 + 27,8 \times 10^{-6} \times 2.000 + 11,1 \times 10^{-12} \times \overline{2.000^3}$	0,592
C^6H^6	Nous prendrons 0,400 (aucun renseignement précis à cette température)	

Avec ces données, nous avons trouvé pour les chaleurs spécifiques :

$$C' = 0,255 \quad C'' = 0,300$$

d'où $K = 603 + (0,300 - 0,255) \times 273 = 591$ calories.

Valeur de H . — Nous avons posé ci-dessus :

$$H = \frac{K M' J}{R}$$

M' = masse moléculaire du mélange.

Et en prenant les valeurs numériques :

$$H = \frac{591 \times 31,3 \times 4,18}{8,3} = 9.330 .$$

39) Valeurs de γ' et γ'' .

On sait que :

$$C = \frac{R \gamma}{J M (\gamma - 1)} ,$$

d'où :

$$\gamma = \frac{1}{1 - \frac{R}{J C M}}$$

$$\gamma' = \frac{1}{1 - \frac{R}{J C' M'}}$$

$$\gamma'' = \frac{1}{1 - \frac{R}{J C'' M''}}$$

En passant aux valeurs numériques, il vient :

$$\gamma' = 1,32 \qquad \qquad \gamma'' = 1,26$$

Nous disposons maintenant de toutes les grandeurs nécessaires pour appliquer les formules (10), (11), (12) :

$$\gamma' = 1,32 \qquad \gamma'' = 1,26 \qquad H = 9.330 \qquad T_0 = 539$$

40) Valeurs numériques.

Le tableau suivant donne quelques valeurs correspondantes calculées à l'aide des formules ci-dessus.

TABLEAU DES VALEURS CORRESPONDANTES DE π , x ET $\frac{V_x}{V}$

$\pi = \frac{p}{p_1}$	$x = \frac{m}{M}$	$\frac{V_x}{V}$
1,2	0,047	0,17
2	0,228	0,54
3	0,457	0,77
4	0,690	0,895
5	0,925	0,98
5,32 = π_1	1	1

Il résulte de la théorie précédente :

1° Que la pression dans le tube croît, très approximativement, proportionnellement à la masse de mélange brûlé.

2° Que le déplacement de la flamme se fait rapidement au début par rapport à la quantité de mélange brûlé, puis vers la fin de la déflagration, le déplacement de la flamme est faible pour une combustion importante.

3° La pression augmente lentement au début de la progression de la flamme et croît rapidement vers la fin de la combustion.

4° Nous n'avons aucun renseignement théorique sur la variation de ces divers facteurs en fonction du temps. Les photos obtenues peuvent expérimentalement combler cette lacune, puisqu'elles donnent la position de la flamme (autrement dit le rapport $\frac{V_x}{V}$ en fonction

du temps), toutefois ce renseignement est incomplet, car il ne faut pas perdre de vue que la combustion n'est pas complète lorsque la flamme a traversé le tube. Une fraction seulement de la déflagration a eu lieu pendant cette période et nous ne savons pas quelle est sa valeur.

41) Note.

Les quelques résultats que nous présentons ici constituent une étude encore fort incomplète, mais que nous nous proposons de poursuivre.

Il y aura lieu de reprendre ces essais avec une lentille et un tube de quartz, de faire varier encore les dimensions du tube et d'étudier de nouveaux carbures et gaz.

Qu'il nous soit permis pour terminer de rendre hommage à tous ceux qui nous ont aidé :

MM. les professeurs Cotton et Jouguet qui nous ont donné de précieux et nombreux renseignements.

MM. Villey et Aubert qui ont suivi pas à pas ces modestes travaux et nous ont souvent servi de guides précieux.

M. Pignot qui nous a ouvert la voie dans ces recherches et nous a souvent aidé.

Nous sommes également grandement redevables au Service Technique de l'Aéronautique qui nous a fourni un matériel très bien usiné, au Laboratoire de recherches physiques de la Sorbonne où nous avons toujours trouvé la plus grande complaisance et, enfin, au Laboratoire de recherches chimiques de la Société du Gaz de Paris, dont le Directeur, M. le Professeur Mailhe, a bien voulu nous prêter quelques précieux appareils.

SECONDE THÈSE

Propositions données par la Faculté

LES CORPS INTERMÉDIAIRES

qui

PRENNENT NAISSANCE AU COURS DES COMBUSTIONS

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

S. CHARLÉTY

Vu et approuvé :

Paris, le 31 octobre 1928

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

Ch. MAURAIN

